

Treball de Fi de Grau

Titulació

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

**Disseny i simulació amb el mètode dels elements finits
d'un quadre de bicicleta de carretera de fibra de carboni**

MEMÒRIA

Autor: Pau Alcoverro Colom
Director: Emilio Angulo
Ponent:
Convocatòria: Gener 2017



**Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona**



Resum

Aquest treball té el seu origen en la pràctica esportiva del ciclisme.

L'objectiu d'aquest projecte ha estat la creació d'un quadre de bicicleta de carretera de fibra de carboni que aportí una millora de prestacions respecte un quadre inicial simple tot complint un seguit d'especificacions preestablertes.

Per tal d'aconseguir complir amb aquest objectiu i pel fet de no disposar d'un disseny inicial a partir del qual començar la millora, s'ha creat un primer disseny simple que s'ha fet evolucionar fins a la obtenció del disseny definitiu millorat.

Per tal de mesurar les prestacions d'aquest quadre, s'han dissenyat diversos tests estructurals que han estat simulats amb el programa Ansys Workbench sobre el quadre de bicicleta de fibra de carboni. Els resultats d'aquestes simulacions han estat comparats amb els obtinguts després d'aplicar els mateixos tests un quadre d'alumini de gamma similar, definit també en el marc d'aquest projecte.

Amb els resultats obtinguts dels tests simulats s'ha pogut concloure que el quadre de fibra de carboni creat compleix amb la majoria d'especificacions preestablertes i que aporta una major rigidesa i una reducció de les tensions internes respecte al quadre d'alumini.

Sumari

RESUM	2
SUMARI	3
1. INTRODUCCIÓ	5
1.1. Objectius del projecte.....	5
1.2. Abast del projecte	5
1.3. Justificació.....	7
1.3.1. Justificació Industrial.....	7
1.3.2. Justificació Personal	7
2. ESTAT DE L'ART	9
2.1. Història	9
2.2. La Fibra de Carboni	10
2.2.1. Materials base.....	10
2.2.2. Procés d'obtenció de la fibra de carboni.....	11
2.2.2.1. Obtenció de fibra de carboni a partir de PAN	12
2.2.2.2. Obtenció de fibra de carboni a partir de Brea	14
2.2.2.3. Postprocés.....	16
2.2.3. Preconformat i elecció del polímer del compost de fibra de carboni	16
2.2.3.1. Filat de la fibra de carboni.....	17
2.2.3.2. Polímers.....	19
2.2.4. Fabricació i conformat	20
2.3. Construcció de bicicletes de fibra de carboni	23
2.3.1. Disposició de les fibres de carboni	23
2.3.2. Mètode de conformat del quadre.....	24
3. ESPECIFICACIONS	27
4. DISSENY DEL QUADRE I SIMULACIÓ AMB EL MÈTODE DELS ELEMENTS FINITS	28
4.1. Restriccions prèvies	28
4.2. Disseny.....	31
4.3. Definició dels materials	35
4.4. Simulacions amb el mètode dels elements finits.....	36
4.4.1. Mètode dels elements finits	36
4.4.2. Simulacions	38
4.4.2.1. Test de rigidesa a flexió	39

4.4.2.1.1	Test de rigidesa a flexió amb força de +600N	40
4.4.2.1.2	Test de rigidesa a flexió amb força de -600N	43
4.4.2.2.	Test de rigidesa a torsió	48
4.4.2.2.1	Test de rigidesa a torsió del triangle principal	48
4.4.2.2.2	Test de rigidesa a torsió del triangle posterior	53
4.4.2.3.	Test de rigidesa a la pedalada	59
4.4.2.4.	Test de xoc amb massa caient	69
5.	ANÀLISI GLOBAL DELS RESULTATS	75
6.	PRESSUPOST	77
7.	IMPACTE AMBIENTAL	80
8.	PLANIFICACIÓ	82
9.	CONCLUSIONS	83
	AGRAÏMENTS	85
	BIBLIOGRAFIA	86
	Referències bibliogràfiques	86

1. Introducció

1.1. Objectius del projecte

L'objectiu d'aquest treball és dissenyar un quadre de bicicleta de fibra de carboni de carretera no de competició, que aportí una millora de prestacions respecte un quadre inicial simple tot complint un seguit d'especificacions establertes.

Per verificar la millora en les prestacions he fet estudis estructurals mitjançant el mètode dels elements finits i n'he comparat els resultats amb els obtinguts dels mateixos estudis realitzats en un xassís d'alumini de categoria similar.

Per tal d'assolir aquest objectiu, i pel fet de no disposar d'un disseny inicial, s'ha partit d'un disseny simple creat per mi a partir de les mesures bàsiques d'una bicicleta del mercat i s'ha anat modificant fins a assolir un disseny millorat en termes de rigidesa i reducció de les tensions internes.

L'estudi de les prestacions del quadre es realitzarà en base a quatre tests diferents, alguns en règim estacionari i altres en règim transitori, basats en els tests de seguretat que determina la *Normativa europea de seguretat i mètodes de test per a bicicletes de competició* (EN 14781).

En cada un d'aquests tests seran estudiades quatre propietats: la deformació màxima, la tensió a tracció màxima, la tensió a compressió màxima i la tensió de cisalla màxima, i tant el seu valor com la localització dins dels quadres en la què tenen lloc.

1.2. Abast del projecte

Aquest treball s'ha centrat en el disseny d'un quadre de bicicleta de carretera de fibra de carboni i en la simulació de diversos tests mecànics que se li han realitzat. Aquests tests s'han comparat amb els obtinguts en un altre model d'alumini de similar categoria tot assolint unes conclusions finals. A continuació s'enumeren els passos assolits en aquest projecte.

- S'ha fet un estudi de l'estat de l'art respecte a la fibra de carboni i al seu ús en bicicletes.
- S'han establert unes especificacions en base a les prestacions dels diferents models que hi ha al mercat.

- S'han creat en CAD un disseny final d'un quadre de bicicleta de carretera fruit de la optimització i millora d'un disseny inicial simple.
- S'ha modelitzat la fibra de carboni per tal de poder simular estudis estacionaris i transitoris i s'ha estudiat l'alumini com a material alternatiu a la fibra de carboni.
- S'han simulat quatre tests diferents per als diferents dissenys, estudiant-los tant en fibra de carboni com en alumini, que s'han concretat en els resultats per a cada un dels quadres. Els tests simulats han estat els següents: un test de flexió, un test de torsió, un test de pedaleig, i un test d'impacte.
- S'han obtingut resultats qualitius i quantitius dels paràmetres següents: deformació màxima, tensió màxima a tracció, tensió màxima a compressió, tensió màxima de cisalla.
- S'han comparat els resultats de les simulacions tot obtenint uns resultats comparatius definitius.
- S'ha avaluat els resultats en funció de les especificacions i s'ha provat que el quadre creat complia la major part d'elles.
- S'ha realitzat un pressupost del cost del projecte fins al punt actual i una aproximació al cost que implicaria la seva continuació.
- S'ha fet un càlcul de l'impacte ambiental que ha comportat aquest projecte i una aproximació a l'impacte que suposaria la seva realització final.
- S'han assolit unes conclusions respecte a si el quadre creat compleix amb les especificacions establertes i quin dels dos materials estudiats és el més adient per a la fabricació d'un quadre de bicicleta de carretera.

Com a continuació d'aquest treball, seria interessant seguir amb els següents passos, tot mantenint l'ordre establert a continuació. Aquests punts no han pogut ser duts a terme per no disposar de més recursos i temps.

- Realitzar de nou la simulació del test de pedaleig amb un equipament més potent per tal d'obtenir resultats en més instants de temps i per tant més precisos i acurats.
- Realitzar assajos amb provetes de fibra de carboni per tal d'obtenir la seva corba de resiliència.
- Simular tests de fatiga i el test d'impacte per al quadre de fibra de carboni que no ha pogut ser simulat en el treball a causa de l'absència dels assajos experimentals.
- Refer el disseny tenint en compte tots els ancoratges necessaris per al funcionament de la bicicleta, en el que es refinessin totes les interfícies amb la resta de components que van collats en aquests acoraments.
- Crear un prototip del disseny en fibra de carboni.
- Realitzar experimentalment els tests simulats en el treball amb els prototips.
- Realitzar els tests de seguretat requerits per la Unió Europea, tant d'impacte com de fatiga, per al prototip.

I en fases futures fer un pla d'industrialització per tal de poder treure el quadre de bicicleta al mercat.



1.3. Justificació

1.3.1. Justificació Industrial

Per al desenvolupament d'aquest projecte, he suposat que sóc un enginyer que ha estat contactat per l'empresa Monty, una empresa que es dedica a fabricar bicicletes, que es planteja entrar en el mercat de les bicicletes de fibra de carboni.

Aquesta empresa m'ha encarregat el projecte de dissenyar un quadre de bicicleta de carretera no de competició d'aquest material, que compleixi un seguit d'especificacions tot millorant les prestacions d'un quadre d'alumini d'una gamma similar creat pel seu equip d'enginyers.

Per tal d'acceptar el meu disseny l'empresa sol·licita la realització de simulacions en el quadre per tal de veure numèricament si compleix o no amb els seus requeriments.

Si el disseny resultant del projecte compleix amb les especificacions que se m'han reclamat, l'empresa pretén, a posteriori, crear un prototip amb el qual fer els diferents tests simulats en el meu projecte i els diversos tests de seguretat imposats per la Unió Europea. Finalment si aquests tests resulten satisfactoris, Monty estudiarà fabricar i posar al mercat el quadre dissenyat.

1.3.2. Justificació Personal

Personalment, aquest projecte va néixer pel meu interès pel ciclisme iniciat fa molts anys. Aquest interès per aquest esport ràpidament es va convertir en un interès també per les eines amb el que es practica, és a dir les bicicletes. Aquest interès esportiu, lligat al fet d'estar estudiant Enginyeria Industrial i al d'estar atent als avenços tecnològics constants en el món de la competició esportiva, va fer que em comencés a interessar en el disseny de les bicicletes, en els seus nous materials i en les geometries i a fer-me preguntes com les de: "per què aquest material?", o "per què aquesta forma?". Aquestes preguntes que inicialment eren només teòriques van reforçar-se després d'un accident en el qual se'm va trencar la meua bicicleta de carretera per una zona que no esperava. Quan al cap d'un temps vaig haver de triar un tema per al Treball de Final de Grau no vaig tenir cap dubte: volia entendre mecànicament com era una bicicleta, conèixer millor els seus possibles materials així com els punts forts i crítics de la seva geometria.

En aquest projecte, vaig decidir treballar amb la fibra de carboni com a material principal ja que, pel que ja tenia entès abans de començar-me a informar, és el material amb millors prestacions que hi ha actualment per a la fabricació de quadres de bicicleta. A més, aquest material és un material de futur amb unes grans aplicacions tecnològiques més enllà de l'esport de competició i sobre el que no hem rebut cap aprenentatge al llarg de la carrera. També hi va influir el fet que aquest és un material anisotròpic, és a dir que les seves

propietats varien en funció de la direcció en la que són estudiades, i aquests tipus de materials quasi no s'han treballat al llarg del Grau en Enginyeria Industrial; per tots aquest motius vaig creure que seria molt interessant aprofundir en els coneixements d'aquest material.

En aquest projecte, lligat al meu interès personal per les bicicletes, he intentat dissenyar la bicicleta que algun dia m'agradaria poder construir per a mi mateix, i és per això que tots els models dissenyats en aquest treball són de la talla 58, que és la que correspon a una persona de la meua alçada.



2. Estat de l'art

2.1. Història

Des que van ser creades al segle XIX, les bicicletes han viscut grans canvis així com una expansió en el seu ús fins i tot arribant al punt de ser utilitzades en diversos exèrcits a mitjans del segle XX.

Malgrat aquest ús tan extens, durant les primeres dècades del segle XX la seva evolució es va veure frenada i no va ser fins als anys 80 en què les noves evolucions tecnològiques van començar a ser aplicades, primer per a l'esport d'alta competició, i més endavant per a les bicicletes per al gran públic. Durant aquestes anys, amb l'aparició de noves bicicletes aerodinàmiques de contrarellotge, es va començar a veure la gran importància de la bicicleta a l'hora d'aconseguir l'èxit esportiu. Molt aviat, a l'intent de millorar les formes de la bicicleta s'hi va afegir l'intent de reduir-ne el pes sense perdre rigidesa i aquest intent ràpidament va saltar del ciclisme de contrarellotge a totes les altres modalitats de competicions ciclistes i en especial al ciclisme de carretera en ruta.

Al llarg dels anys aquest interès per reduir el pes de les bicicletes va fer que es comencés a treballar amb nous materials deixant obsolets els materials anteriorment utilitzats. L'any 1994 va ser l'últim anys en que una bicicleta amb el quadre d'acer va guanyar el Tour de França, la major prova de ciclisme de carretera en ruta del món, i el 1998 va ser l'últim any en que una bicicleta amb el quadre d'alumini va guanyar la volta francesa. A partir de llavors i fins a l'actualitat, tots els quadres guanyadors han estat elaborats amb compostos de fibra de carboni.

A part d'aquest materials, al llarg dels anys la indústria del sector també ha treballat amb altres materials com ara la fusta o el titani. La fusta va ser emprada en els inicis ciclisme però degut al seu alt pes i a les imperfeccions i punts febles imprevisibles, causats per la presència de nusos i esquerdes que impossibilitaven la fabricació en massa de quadres d'aquest material, va ser descartada ràpidament. A l'actualitat es segueixen produint quadres de bicicletes de fusta, però són quadres únics i personalitzats, normalment molt cars i amb unes prestacions que disten de les d'altres materials com la fibra de carboni o l'alumini. El titani, un material molt utilitzat per a l'enginyeria aeroespacial, també va ser utilitzat sobretot per a la fabricació de bicicletes d'alta competició per les seves altes prestacions mecàniques, però el seu alt cost i la seva gran densitat el van fer quedar ràpidament obsolet.

2.2. La Fibra de Carboni

Tal com s'ha vist anteriorment degut a les molt millors prestacions que presenten els compostos de fibra de carboni la indústria del ciclisme fa anys que ja no inverteix en la recerca en materials com ara l'alumini, l'acer o el titani, i és per això que a partir d'aquest punt en aquest projecte s'estudiarà com a material només la fibra de carboni i l'alumini serà utilitzat només com a referència de comparació en termes de propietats i prestacions.

2.2.1. Materials base

El primer ús de la fibra de carboni és atribuït a la carbonització de fibres de cotó i bambú fetes per Thomas Edison, però no va ser fins el 1958 Roger Bacon va crear les primeres fibres d'alt rendiment de carboni encarades cap al reforç de materials al Centre Tècnic de la Unió Carbide Parma, a Cleveland, Ohio, Estats Units. A partir de llavors, es va veure les increïbles possibilitats que podien tenir aquest tipus de fibres i arreu del món van començar-se a estudiar millors maneres d'obtenir aquests filaments tot millorant-ne les prestacions i reduint-ne el cost d'obtenció.

La fibra de carboni es pot obtenir a partir d'innumerables materials diferents ja que l'objectiu dels diferents processos d'obtenció és aconseguir llargs filaments amb un alt contingut de carboni i per tant amb un nombre reduït d'impureses, i són molts els materials que contenen carboni en la seva composició química. Malgrat això, en són pocs que permeten obtenir aquests filaments amb una bona relació de rendiment mecànic respecte al costs d'obtenció.

De tots els materials amb una bona relació rendiment-cost tals com fenols, la lignina, diferents amides, polímers de vinil o fibres naturals com el cotó o el bambú en destaquen principalment tres:

- el PAN (poliacrilonitril)
- la brea (substància obtinguda de la destil·lació del quitrà)
- el raió (seda artificial).

El raió, malgrat tenir un cost de matèria prima molt baix, ha acabat sent desestimat i en l'actualitat menys de l'1% de les fibres de carboni produïdes al món són obtingudes a partir d'aquest material. Aquest fet és degut a les baixes propietats del producte final. Aquestes propietats poden ser millorades mitjançant un procés de grafitització però l'augment de cost que comporta aquest procés és major que l'augment del rendiment i per tant és encara menys òptim.

La brea és el material amb un millor rendiment final i té un cost de matèria prima molt baix



però amb un alt cost de processament per a l'obtenció de filaments de brea previs a l'obtenció de la fibra de carboni. Degut a aquest alt cost de preprocessament només un 10% de la fibra de carboni produïda és feta a partir d'aquest material.

Per la seva banda, el PAN (poliacrilonitril) presenta una millor relació de rendiment respecte al cost de la matèria prima i de processat i ha acabat esdevenint el material més utilitzat per a l'obtenció de la fibra de carboni to fent que en l'actualitat un 90% de totes les fibres de carboni estiguin fetes a partir de fibres de PAN.

2.2.2. Procés d'obtenció de la fibra de carboni

Els processos d'obtenció de la fibra de carboni de a partit de PAN i de brea, que entre els dos abasten quasi la totalitat del volum de fibra de carboni que es produeix a l'actualitat, malgrat ser diferents, es poden dividir ens els mateixos passos generals:

- obtenció dels filaments de fibra de carboni
- tractaments tèrmics per millorar-ne les propietats mecàniques

Aquest passos, que a continuació s'explicaran amb més detall, units a un seguit de tractaments superficials posteriors permeten passar del material base al rodet de fibra de carboni final a partir del qual es podrà crear la malla que, unida amb un o diversos polímers, formaran el compost de fibra de carboni.

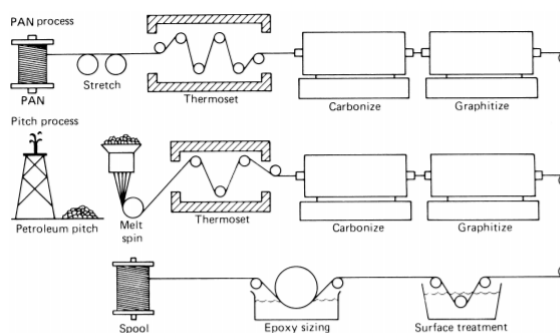


Fig. 1 The processing sequence for polyacrylonitrile (PAN) and mesophase-pitch-based precursor fibers shows the similarities for the two processes. Highly oriented polymer chains are obtained in PAN by hot stretching, while high orientation in pitch is a natural consequence of the mesophase (liquid crystalline) order.

Fig. 2.1. Seqüència dels processos seguits per a l'obtenció de la fibra de carboni a partir de PAN i de Brea. [1]

2.2.2.1. Obtenció de fibra de carboni a partir de PAN

Normalment el PAN està copolimeritzat amb altres monòmers com ara el metacrilat. Normalment aquestes fibres precursors contenen entre un 93% i un 95% d'acrilonitril, i el 5%-7% restant correspon a els següents monòmers:

Monomer	Structure
Acrylic acid	$\begin{array}{c} \text{H} & & \text{H} \\ & \backslash & / \\ & \text{C}=\text{C} \\ & / & \backslash \\ \text{H} & & \text{C}=\text{O} \\ & & \\ & & \text{OH} \end{array}$
Itaconic acid	$\begin{array}{c} & & \text{OH} \\ & & \\ \text{H} & & \text{C}=\text{O} \\ & \backslash & / \\ & \text{C}=\text{C} \\ & / & \backslash \\ \text{H} & & \text{CH}_2 \\ & & \\ & & \text{C}=\text{O} \\ & & \\ & & \text{OH} \end{array}$
Methacrylic acid	$\begin{array}{c} & & \text{OH} \\ & & \\ \text{H} & & \text{C}=\text{O} \\ & \backslash & / \\ & \text{C}=\text{C} \\ & / & \backslash \\ \text{H} & & \text{CH}_3 \end{array}$
Methyl acrylate	$\begin{array}{c} \text{H} & & \text{H} \\ & \backslash & / \\ & \text{C}=\text{C} \\ & / & \backslash \\ \text{H} & & \text{C}=\text{O} \\ & & \\ & & \text{O} \\ & & \\ & & \text{CH}_3 \end{array}$
Vinyl acetate	$\begin{array}{c} \text{H} & & \text{H} \\ & \backslash & / \\ & \text{C}=\text{C} \\ & / & \backslash \\ \text{H} & & \text{O} \\ & & \\ & & \text{C}=\text{O} \\ & & \\ & & \text{CH}_3 \end{array}$
Acrylonitrile	$\begin{array}{c} \text{H} & & \text{H} \\ & \backslash & / \\ & \text{C}=\text{C} \\ & / & \backslash \\ \text{H} & & \text{CN} \end{array}$

Fig. 2.2. Monòmers amb els que es pot polimeritzar l'acrilonitril per formar les fibres de PAN precursors a l'obtenció de fibra de carboni. [2]

Un dels principals conflictes per a l'obtenció de fibra de carboni a partir de PAN és que aquest es descompon a una temperatura inferior a la seva temperatura de fusió, i això implica que hagi de ser guardat dissolt en un dissolvent adequat, com ara el dimetilacetamida. Partint d'aquesta solució, amb una concentració del polímer d'entre un 15% i un 30%, cal utilitzar diferents processos químics de coagulació per acabar aconseguint els filaments de PAN.

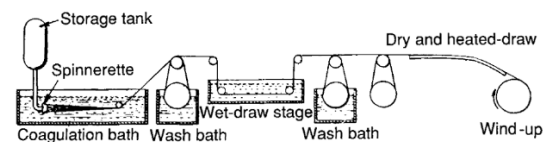


Figure 2. Schematic of process for wet-spinning PAN precursor fibers (ref. 2).

Fig. 2.3. Seqüència detallada del procés d'obtenció dels filaments de PAN. [2]



Un cop s'han aconseguit els filaments de PAN es procedeix amb la termoestabilització mitjançant l'oxidació amb tensió i posteriorment amb la carbonització i la grafitització.

EL procés d'oxidació amb tensió, que es realitza a una temperatura d'entre 220°C i 280°C permet convertir les molècules de PAN en una xarxa d'anells hexagonals Carboni-Nitrogen:

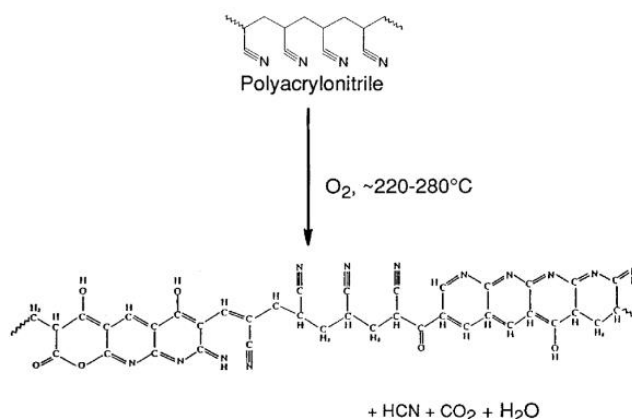


Fig. 2.4. Reacció química durant el procés d'oxidació amb tensió de les fibres de PAN. [2]

Finalment es procedeix amb la carbonització i a vegades la grafitització escalfant a poc a poc les fibres en un ambient inert fins a una temperatura d'entre 1000°C i 2800°C per tal d'extreure els elements que no són Carboni de la fibra. Les fibres resultants tenen una proporció d'entre el 80% i el 99% de Carboni, depenent de la temperatura final de carbonització. La carbonització i la grafitització són el mateix procés, la diferència rau en que la carbonització es realitza a una temperatura inferior o igual a 1700°C mentre que es considera grafitització quan el procés es realitza entre 1700°C i 3000°C.

Al llarg d'aquest procés entre un 55% i un 60% en massa de les fibres de PAN són descartades tot donant lloc a una massa de fibra de carboni d'entre un 40% i un 45% de la massa de fibra precursora.

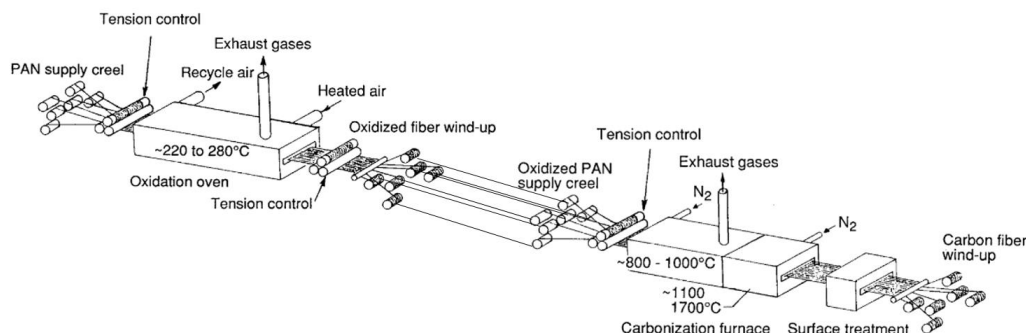


Fig. 2.5. Processos d'oxidació en tensió, carbonització i grafitització de les fibres de PAN. [2]

2.2.2.2. Obtenció de fibra de carboni a partir de Brea

Per a l'obtenció de fibra de carboni a partir de brea, és necessària la carbonització de la brea.

En un inici del procés i gràcies a l'augment de la temperatura la brea esdevé més líquida formant una substància homogènia i isòtropa. Aquest augment de la temperatura porta a la destil·lació dels compostos que són estables a la seva temperatura d'ebullició i a un seguit de reaccions químiques, entre les que predomina la polimerització. Aquestes reaccions químiques porten a la formació de macromolècules amb una estructura laminar ordenada que s'anomenen mesògens i que s'uneixen entre elles amb forces de Van der Waals tot apilant-se amb piles paral·leles.

Aquestes piles de gran densitat poden separar-se del medi en el que es troben tot formant petites esferes òpticament anisotròpiques. El conjunt d'aquestes esferes s'anomena mesofase. Amb el temps i la temperatura aquestes esferes van creixent i van fusionant-se les unes amb les altres fins que ja no es poden moure i donen lloc a coc que és un material de carboni grafititzable.

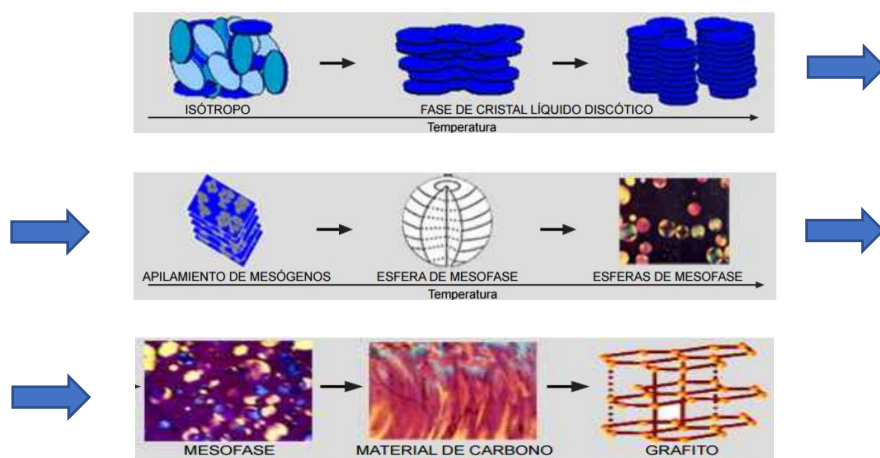


Fig. 2.6. Evolució a nivell molecular des de l'inici de la carbonització de la brea fins a l'obtenció de grafit. [3]

Les propietats i característiques del material final depenen en bona mesura del material de partida, de la temperatura a la que es produeixen les reaccions químiques així com el seu temps de durada, i en especial, de l'interval de temperatura entre que es comença a crear la mesofase i que aquesta s'endureix per donar lloc al coc.



Un cop s'ha obtingut el coc amb les propietats desitjades, depenent del seu origen i tractament, aquest pot ser un bon conductor tèrmic i elèctric amb un baix coeficient d'expansió tèrmica, cosa que implica que les fibres de carboni resultant siguin òptimes per treballar a grans temperatures, o bé altres amb una alta resistència mecànica, molt més òptims per a usos estructurals com és el cas dels quadres de bicicleta de fibra de carboni.

Un cop s'ha obtingut el coc, aquest és introduït a la tremuja d'alimentació de la màquina que permetrà obtenir els filaments de fibra de carboni, tal com es pot veure a la figura 2.7. El coc passa a través de la boca d'alimentació a un vis sense fi en què és escalfat fins a assolir la viscositat desitjada. Al final del vis hi ha un extrusor que és el que converteix la massa de coc degudament escalfada en els filaments de fibra de carboni. Finalment aquests filaments de fibra de carboni passen per una zona de filtrat que s'encarrega d'eliminar possibles impureses.

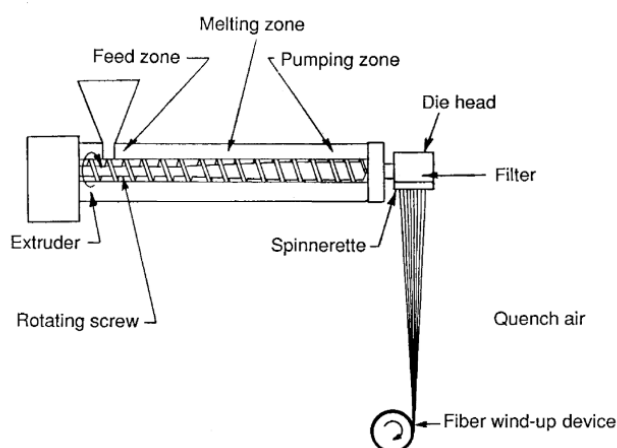


Fig. 2.7. Màquina que permet la obtenció de filaments de fibra de carboni a partir de coc provinent de brea. [2]

Un cop obtinguts els filaments de fibra de carboni, aquests són tractats tèrmicament per tal d'obtenir una major puresa i una millora de les seves propietats mecàniques, però en aquests casos les fibres no requereixen uns tractaments tèrmics posteriors tan exhaustius com en el cas de les fibres provinents de PAN. Això és degut a que, durant la creació del coc, les molècules ja es troben orientades fent que la fibra resultant ja presenti una orientació molecular en la direcció de les fibres i per tant els tractaments tèrmics posteriors no cal que siguin tan intensos.

El procés d'obtenció de fibres de carboni a partir de brea, malgrat ser més costós que el procés d'obtenció a partir de PAN pel fet de requerir un gran control del medi en el que es produeixen les reaccions químiques, té una eficiència molt més elevada ja que l'estructura molecular inicial de la brea és molt més similar a la del grafit que en el cas del PAN i així

implica que es necessiti menys energia per a obtenir les fibres de carboni provinents de la brea. A més, el percentatge de fibra de carboni final obtinguda és un 75% de la massa de brea de mesofase (brea amb una estructura de mesofase) de la que es disposava mentre que en el cas de les fibres provinents de PAN era només del 40%-45% de la massa inicial cosa que implica que aquest procés generi molts menys residus.



Fig. 2.8. Brea utilitzada per a la fabricació de fibra de carboni

2.2.2.3. Postprocés

Un cop obtinguts els filaments de fibra de carboni, ja siguin provinents de PAN o bé de brea, aquests són postprocessats. L'objectiu final d'aquests postprocessos poden ser molts i diversos, però entre ells en destaquen dos. El primer és aconseguir millorar l'adherència amb la matriu polimèrica amb la que es barrejaran, i per això es recorre a la oxidació per tal de d'aconseguir grups superficials oxigenats, i l'altre té per objectiu la igualació dels diàmetres de les fibres al diàmetre desitjat per tal que tots els filaments tinguin les mateixes propietats mecàniques.

El resultat final de tots aquets processos són uns filaments de fibra de carboni amb altes propietats mecàniques en la direcció de les fibres.

2.2.3. Preconformat i elecció del polímer del compost de fibra de carboni

Un cop obtinguts els filaments de fibra de carboni, el següent pas és el conformat del compost de polímer reforçat amb fibra de carboni. Tal com el seu nom indica, en aquest tipus de compostos, la fibra de carboni és un reforç estructural, però el material que dona cos al compost és el polímer.

Abans de mesclar els dos materials per acabar formant el compost final, cal realitzar dos processos previs. Un és l'ordenació o filat dels filaments de fibra de carboni, i l'altre l'elecció del polímer amb el que es mesclarà la fibra de carboni. A continuació s'expliquen més



detalladament ambdós processos.

2.2.3.1. Filat de la fibra de carboni

Un cop es tenen els filaments de fibra de carboni, tant si han sigut obtinguts a partir de PAN o a partir de brea, aquests filaments han de ser filats.

Els filaments de fibra de carboni tenen un diàmetre que pot oscil·lar entre 5µm i 8 µm i són filats entre ells per formar fils de diversos milers de filaments. Aquests fils resultants es poden classificar en funció de diversos paràmetres, però els dos principals són el nombre de filaments pels que estan formats i el mòdul elàstic del fil resultant. A continuació es presenten les principals categories que hi ha al mercat de les dues classificacions:

- Segons el nombre de filaments que componen cada fil o fibra:
 - o 1K
 - o 2K
 - o 3K
 - o 12K

Aquests noms venen determinats pel nombre de filaments que componen cada fil o fibra (1K correspon a un fil format per 1000 filaments, 2K correspon a un fil format per 2000 filaments, i així successivament).

- Segons el seu mòdul elàstic:
 - o Ultra-High Modulus (UHM) → >600 GPa
 - o High Modulus (HM) → 350-600 GPa
 - o Intermediate Modulus (IM) → 280-350 GPa
 - o Standard Modulus (SM) → 200-280 GPa
 - o Low Modulus (LM) → 100-200 GPa

Un cop es tenen els fils de fibra de carboni, el pas previ a la unió amb el polímer és l'ordenació i orientació d'aquests fils per tal de formar la malla de fibra de carboni. Aquesta orientació és la que determinarà les propietats de la fibra resultant ja que de fet, s'està orientant el reforç i amb aquesta orientació s'estableix en quines direccions el compost tindrà millors i pitjors propietats mecàniques. Segons la orientació de les fibres els materials compostos es poden dividir en dos grans grups:

- Unidireccionals. Les fibres o fils de fibra de carboni estan orientats en una única direcció.
- Bidireccionals. Les fibres de carboni estan orientades en dues direccions perpendiculars i entrecruades entre elles. Aquest tipus també s'anomena "Fabric" que significa tela en anglès. Dins de les fibres bidireccionals a més hi ha

diferents tipus de fibres que es diferencien per la manera en que estan entrecreuats els fils.

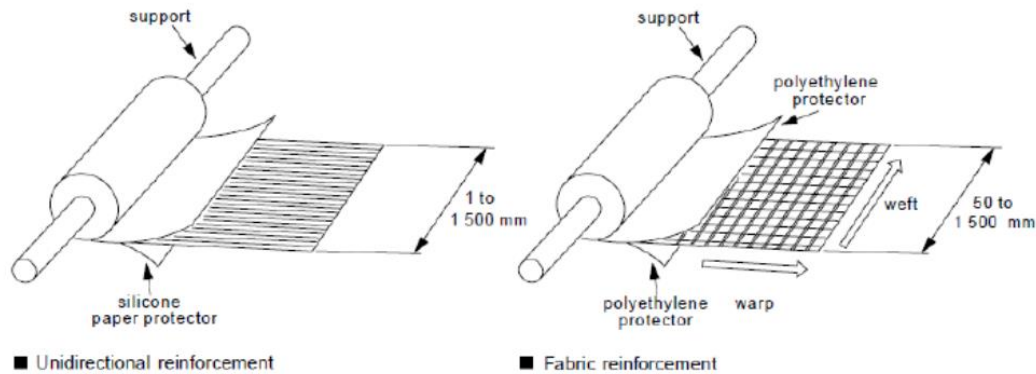


Fig. 2.9. Orientació unidireccional i bidireccional de la fibra de carboni

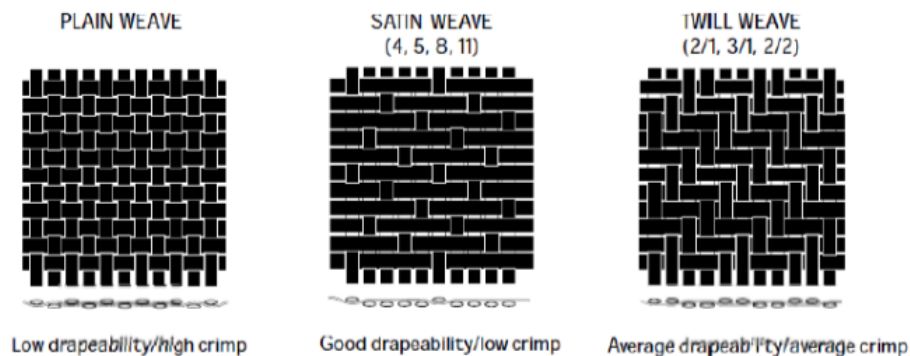


Fig. 2.10. Diferents exemples de possibles encreuaments de fibres bidireccionals

Segons la manera d'estar encreuades les fibres, la malla presenta unes característiques diferents. Com més entrecreuades estiguin les fibres, més atapeïda serà la malla però això també comporta que la seva capacitat per cobrir sigui menor, i per tant, es requerirà més fibra per a cobrir una mateixa superfície. Això també es pot expressar com que com més entrecreuada és la tela, més quantitat de fibra hi ha per metre quadrat de tela i per tant la seva rigidesa serà major, així com també el seu pes. Així doncs, observant les tres teles de la figura 2.10, es pot veure que en la primera hi ha molts més encreuaments i per tant aquesta és la que presenta una major rigidesa i un major pes. La segona per la seva banda



és la que presenta una quantitat menor de fibres i per tant és la més lleugera mentre que la tercera presenta una rigidesa i pes intermitjos.

2.2.3.2. Polímers

Per a l'elecció del polímer més adequat per a conformar la matriu del compost a la que s'afegirà la fibra de carboni per a reforçar-la i millorar-ne les propietats, s'ha de tenir molt present l'ús que es pretén fer del compost final.

Normalment s'usen polímers termostables, ja que en general presenten unes propietats mecàniques de rigidesa millors que les dels termoplàstics i un 90% dels polímers per a usos estructurals són d'aquest tipus.

Dins dels polímer termostables usats per a la fabricació dels compostos amb fibra de carboni en destaquen 3:

- resines epoxídiques (grans propietats mecàniques)
- resines fenòliques (gran resistència al foc)
- resines poliamínides (gran resistència a altes temperatures)



Fig. 2.11. Epoxy per a la fabricació de compost de fibra de carboni. Es presenten per separat la resina i l'enduridor.

Així doncs, per a compostos de fibra de carboni per a usos estructurals s'utilitza pràcticament sempre resines epoxídiques i la fabricació de quadres de bicicletes no n'és una excepció i pràcticament la totalitat dels quadres de bicicleta de fibra de carboni estan fets amb una matriu de resina epoxy.

2.2.4. Fabricació i conformat

Un cop obtingudes les matèries primes, la fabricació del compost consisteix en la mescla d'aquestes, tot fent que els filaments de fibra de carboni quedin envoltats per la matriu de polímer tot formant un únic compost.

Aquest procés es realitza impregnant la fibra de carboni amb el polímer, i posteriorment es fa que tingui lloc un procés de polimerització per tal de fixar el polímer amb la fibra al seu interior tot formant el compost.

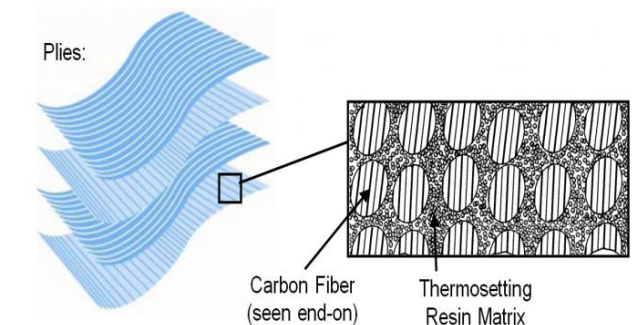


Fig. 2.12. Secció d'un compost de fibra de carboni que mostra les fibres envoltades per la matriu de polímer termostable.

Els mètodes constructius per a conformar els compostos de fibra de carboni són molts i diversos, però en tots ells és comú l'ús de l'autoclau per a la polimerització i curat de les peces. Un autoclau, que és un tipus de forn que permet controlar la pressió i la temperatura del seu interior. Dins d'aquest forn s'augmenta molt la temperatura per tal que es produeixi la polimerització i s'augmenta molt la pressió per tal que les fibres s'enganxin del tot al motlle i adquireixin perfectament la forma d'aquest. Generalment aquest procés es realitza utilitzant un sistema d'aplicació de buit que consisteix en una membrana plàstica que es col·loca al voltant de la peça tot permetent que al seu interior hi hagi el buit menters que al seu exterior hi hagi grans pressions i disposa d'un seguit d'elements que aspiren la quantitat sobrant de resina per tal de minimitzar el pes de la peça i garantir un bon acabat superficial. Aquesta tècnica permet que no es formin bombolles d'aire a l'interior del compost que podrien provocar ruptures o esquerdes.



Fig. 2.13. Autoclau utilitzat per al curat de compostos de fibra de carboni



Les maneres de conformar els compostos de fibra de carboni són moltes i diverses i l'elecció del millor procés de conformat depèn de la geometria i característiques físiques que es desitja que tingui el producte final.

A continuació s'expliquen els principals processos de conformat de compostos de fibra de carboni que s'utilitzen a l'actualitat.

- **Conformat en motllo obert**

o **Conformat per contacte manual**

Aquest tipus de conformat consisteix en la disposició de la fibra de carboni seca, ja sigui en forma de tela o teixit sobre un motllo mascle o femella amb la forma desitjada. Tot seguit s'impregna manualment la fibra de resina.

La polimerització es produeix o bé a temperatura ambient amb estufes o bé amb un curat posterior utilitzant un autoclau amb bossa de buit.

o **Conformat per enrotllat de fils**

Aquest procés tal com el seu nom indica consisteix en anar enrotllant un fil de fibra de carboni al voltant d'un motllo amb la forma desitjada. Els processos d'impregnació i polimerització són els mateixos que els del procés anterior.

Aquest sistema es pot utilitzar només quan la peça que es vol crear té forma de cos de revolució o similar.

o **Conformat per posicionat de fibres**

En aquest procés, una màquina capaç de controlar per separat tots els fils de fibra de carboni va dipositant-los mitjançant un rodets compactador sobre el motllo. Els processos d'impregnació i polimerització són els mateixos que els del procés anterior.

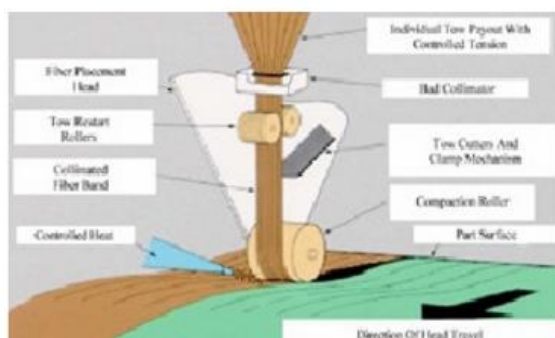


Fig. 2.14. Secció d'un compost de fibra de carboni que mostra les fibres envoltades per la matriu de polímer termostable.

- **Conformat en motlle tancat**

- **Conformat en calent**

Acostuma a ser utilitzat per fer perfils i superfícies a partir de làmines planes. Les fibres normalment són preimpregnades en ves d'afegir la matriu sobre el model un cop aquest ja ha adquirit la forma desitjada.

El conformat acostuma a ser en buit i en un autoclau.

- **Preformes**

En aquest sistema, que utilitza tècniques pròpies de la indústria tèxtil, les fibres de carboni són trenades sobre el motllo. El conformat es realitza en un autoclau.



Fig. 2.15. Procés de conformat en motlle tancat per preformes.

- **Pultrusió**

Aquest sistema permet crear perfils amb una secció constant. Consisteix en agafar una tela o conjunt de filaments, impregnar-los de resina i fer-los passar per uns boca amb la forma del perfil desitjat en la que s'aplica una elevada temperatura per tal que es produeixi la polimerització. Aquesta tècnica és emprada per a la fabricació de tubs i bigues.



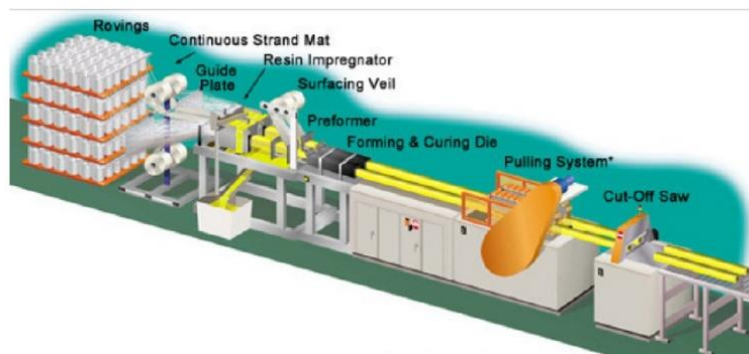


Fig. 2.16_ Esquema del procés d'obtenció de compost de fibra de carboni per pultrusió.

○ Injecció de resina

Aquest mètode consisteix en injectar resina sobre la fibra degudament escalfada col·locada sobre el motlle per tal que n'agafi la forma.

2.3. Construcció de bicicletes de fibra de carboni

Els processos constructius de les bicicletes de fibra de carboni són uns processos molt complexos i sovint manuals propis de cada companyia i que són guardats en gran secret.

Les propietats mecàniques del producte final depenen bàsicament dels següents factors:

- Fibra de carboni utilitzada
- Resina utilitzada
- Disposició de les fibres de carboni
- Mètode de conformat del quadre
- Disseny del quadre

A l'apartat anterior s'ha explicat extensament el procés de creació de la fibra de carboni i s'ha fet una explicació de quines són les resines més utilitzades. La realitat però és que les propietats i composicions de les fibres de carboni i de les resines per a la fabricació de bicicletes són secrets industrials i és per això que en aquest apartat es saltarà directament a les possibles disposicions de les fibres en els quadres i als diferents mètodes constructius emprats a l'actualitat.

2.3.1. Disposició de les fibres de carboni

Els quadres de bicicleta tenen una geometria complexa i han de ser capaços de treballar aguantant forces i moments de molts tipus, ja siguin de torsió, flexió, tracció, compressió...

Aquest fet, lligat al fet d'haver d'aguantar forces i moments flectors de magnituds molt grans fa que no sigui possible fer un quadre de bicicleta utilitzant una única làmina de fibra de carboni. Per a la seva construcció cal que se superposin nombroses capes de fibra en diferents direccions que permetin que la bicicleta tingui un comportament òptim independentment de la direcció de les forces i els moments que actuïn sobre seu.

Els quadres de fibra de carboni poden estar fets d'una superposició de fibres unidireccionals en diferents direccions, o bé de fibres unidireccionals en diferents direccions i fibres bidireccionals.

En general, les prestacions de les bicicletes que combinen l'ús de fibres unidireccionals i bidireccionals són majors però com que, tal com s'ha dit abans, les prestacions finals depenen també de factors com la fibra de carboni utilitzada, la resina o el mètode constructiu, aquesta afirmació no sempre és certa.

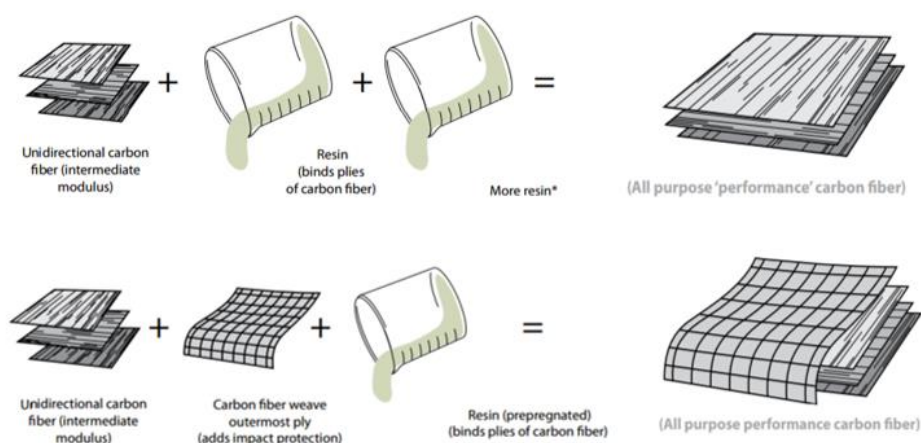


Fig. 2.17. Superposició de fibres unidireccionals i superposició de fibres unidireccionals i bidireccionals. [4]

2.3.2. Mètode de conformat del quadre

Les tècniques constructives poden ser el conformat per contacte manual, el conformat per posicionat de fibres i/o el conformat per pultrusió, o bé una combinació d'aquests. Les diverses maneres de construir els quadres són les següents:

- Monocasc. És un mètode utilitzat bàsicament per a parts grans i té com a principal punt fort el fet de que, al ser tota una peça, és molt rígid i els punts de fatiga es redueixen al mínim. Normalment no es conforma tota una bicicleta amb aquest sistema sinó que amb aquest mètode es creen per separat diverses parts que són posteriorment assembleades. En aquest mètode es pot utilitzar la tècnica del conformat per contacte manual o bé la del posicionat de fibres. És un mètode molt



car però que proporciona uns grans resultats finals. Marques com Specialized o Berria utilitzen el mètode de triple monocasc per a la creació dels seus quadres.



Fig. 2.18. Quadre bicicleta de carretera de la marca Specialized construït amb el mètode de monocasc

- Ràcords i Tubs. Aquest mètode consisteix en unir els diferents tubs utilitzant els ràcords fins a completar la geometria de la bicicleta. Aquest sistema abarateix els costos de producció ja que els tubs es poden construir per pultrusió, que és un mètode molt més eficient i barat que el conformat per contacte manual o la del posicionat de fibres. Aquest mètode però pot provocar ruptures amb més facilitat que el monocasc ja que en aquest hi ha molts més punts d'unió. Les marques Giant i Time, entre moltes altres, utilitzen aquest mètode.



Fig. 2.19. Quadre de la marca Giant construït amb el mètode de ràcords i tubs

- Combinació de monocasc i Ràcords. Aquesta tècnica que barreja les dues anteriors consisteix en crear algunes peces amb la tècnica del monocasc i unir la resta de peces mitjançant ràcords. Aquesta tècnica és utilitzada per marques com Felt entre moltes altres.

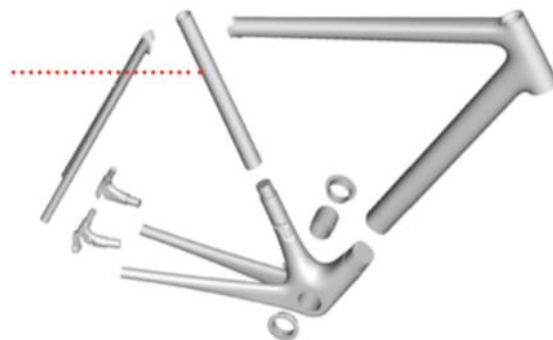


Fig. 2.20. Exemple d'un quadre de la marca Felt construït amb el mètode de combinació de monocasc i ràcords **[4]**

Aquest tres mètodes són els tres mètodes principals de construcció dels quadres de bicicleta. Malgrat això, cada marca té els seus mètodes específics concrets i modificacions d'algun o alguns d'aquests mètodes que guarden en recel i que, per temes de màrqueting i propaganda anomenen d'altres maneres.



3. Especificacions

Per tal que el quadre de bicicleta de fibra de carboni sigui aprovat per l'empresa Monty, aquesta ha establert un seguit d'especificacions basades en les característiques dels models de la competència tot requerint una millora de les prestacions respecte d'un quadre de similar gamma, però d'alumini, creat pel seus enginyers. Si s'assoleix la millora requerida en les especificacions respecte al seu quadre d'alumini, l'empresa valorarà la seva viabilitat de fabricació i inici de producció.

A continuació s'indiquen les especificacions requerides:

Concepte	Valor requerit
Tipus de bicicleta	Bicicleta de carretera
Talla de la bicicleta	Talla 58
Pes màxim	1,1 kg
Relació Rigidesa- Pes	Millora d'un 30% respecte a la del quadre d'alumini
Tensions internes màximes	Reducció d'un 30% respecte a les del quadre d'alumini
Fragilitat	Un 20% major a la del quadre d'alumini com a màxim
Mètode de fabricació	No un únic monocasc
Procés curat	Autoclau al buit
Inversió	Menor de 40000€
Preu de venda màxim del quadre	3000€

Taula 3.21. Especificacions establertes per l'empresa

4. Disseny del quadre i simulació amb el mètode dels elements finits

Atès que no ha estat possible obtenir el model d'alumini dissenyat pels enginyers de l'empresa ni les seves prestacions respecte a les que Monty pretén mesurar la millora, s'ha creat un quadre d'alumini, amb una geometria igual a la geometria del quadre de fibra de carboni per tal de poder comparar i valorar els resultats de la fibra de carboni.

Tot seguit, els dos quadres han estat estudiats a través de diferents tests. Els resultats d'aquests tests per al quadre d'alumini han sigut establerts com els valors de partida respecte als que l'empresa vol la millora. Els resultats del quadre de fibra de carboni, seran els avaluats respecte de les especificacions donades inicialment.

Per a la creació del disseny dels quadres s'ha utilitzat el programa de CAD Solidworks. Amb aquest programa s'ha creat només la superfície dels quadres per tal que posteriorment, en el programa de simulació, es pugui donar el gruix del material escollit en cada cas.

Per a la realització de les simulacions s'ha decidit utilitzar el programa Ansys v15 ja que és un dels programes que aporten uns millors resultats i amb el que s'ha treballat durant la carrera; i més concretament l'Ansys Workbench. Aquest programa, per resoldre les simulacions, utilitza el mètode dels elements finits, que serà explicat més endavant.

4.1. Restriccions prèvies

Per tal de realitzar el disseny i l'estudi mitjançant el mètode dels elements finits es van establir algunes restriccions inicials. Aquestes són fruit de la informació de la que s'ha disposat per a la realització d'aquest projecte, fruit de les especificacions lliurades per Monty així com de la compatibilitat amb els elements que han d'anar acoblats al quadre en el muntatge de la bicicleta.

L'objectiu d'aquest estudi és aconseguir crear un quadre de bicicleta que compleixi amb les especificacions requerides per l'empresa. Tot i que no es disposa de les característiques del quadre inicial, sí que es disposa de les propietats de l'alumini amb el que està fabricat, cosa que permetrà fer un estudi del quadre dissenyat utilitzant aquest material i establint-se aquestes com a prestacions del quadre que té la companyia.

Tot seguit s'enumeren aquestes restriccions establertes:



- La bicicleta dissenyada i estudiada és de la talla 58. Aquesta talla correspon a la talla que utilitza una persona de 1,85 metres d'alçada amb una alçada de maluc mitja o alta.
- El compost de fibra de carboni (compost de fils de fibra de carboni i resina epoxy) utilitzat és un compost amb fibra de carboni unidireccional (UD) amb un gruix de 0,0004m. S'ha escollit aquest compost ja que és l'únic del que s'ha aconseguit obtenir les propietats. Cal fer esment que, malgrat que les fibres de carboni unidireccionals atorguen unes pitjors prestacions a les bicicletes que les bidireccionals, si aquestes fibres són disposades de manera correcta, es pot obtenir un rendiment similar a l'obtingut usant fibres bidireccionals sense tenir així l'augment de preu que suposa l'ús d'aquestes segones fibres. Les propietats mecàniques de la fibra amb la que s'ha treballat són les següents:
 - Mòdul elàstic en $x=147e^9$ Pa
 - Mòdul elàstic en $y=10,3e^9$ Pa
 - Mòdul elàstic en $z=10,3e^9$ Pa
 - Coeficient de Poisson en $xy=0,27$
 - Coeficient de Poisson en $yz=0,54$
 - Coeficient de Poisson en $xz=0,27$
 - Mòdul de resistència a tensions tallants en $xy=7e^9$ Pa
 - Mòdul de resistència a tensions tallants en $yz=3,7e^9$ Pa
 - Mòdul de resistència a tensions tallants en $xz=7e^9$ Pa
 - Densitat= 1600 kg/m^3
 - Resistència a la tracció en $x=2280e^6$ Pa
 - Resistència a la tracció en $y=57e^6$ Pa
 - Resistència a la compressió en $x=1725e^6$ Pa
 - Resistència a la compressió en $x=228e^6$ Pa
 - Resistència a la cisalla en $xy=76e^6$ Pa

[5]

En tots aquests valors es pren com a eix x la direcció de les fibres i els eixos y i z són perpendiculars a la direcció de les fibres.

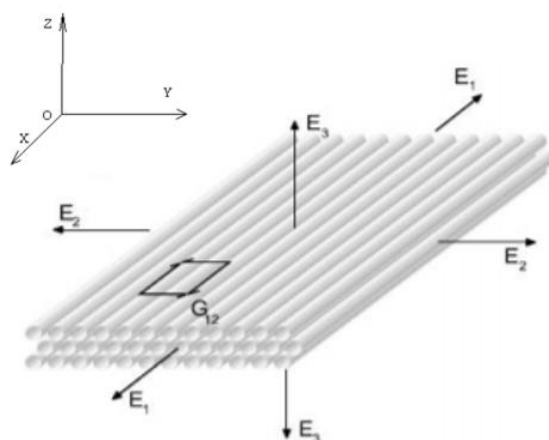


Fig. 4.1 Orientació dels eixos a la fibra de carboni [5]

- L'alumini amb el que està construït el quadre d'alumini del que disposa l'empresa és un alumini estàndard amb les següents propietats:
 - Densitat= 2770 kg/m^3
 - Mòdul de Young = $7,1 \times 10^{10} \text{ Pa}$
 - Coeficient de Poisson= $0,33$
 - Resistència a tracció= $2,8 \times 10^8 \text{ Pa}$
 - Resistència a compressió= $2,8 \times 10^8 \text{ Pa}$
 - Resistència màxima a tracció = $3,1 \times 10^8 \text{ Pa}$
 - Resistència màxima a compressió= 0 Pa
- El Pedaler utilitzat és del tipus BB30. El pedaler és una peça que va inserida al forat que hi ha a la part inferior del quadre i que va unida als pedals, tot permetent que aquests rodin independentment del quadre. Aquesta peça malgrat estar estandarditzada té diferents possibles models amb les seves pròpies dimensions i s'ha escollit el tipus BB30 pel fet de ser un dels més utilitzats en l'actualitat. L'elecció d'aquesta peça ha de ser prèvia a l'inici del disseny de la bicicleta ja que d'aquesta mida en depenen les mesures que ha de tenir l'eix del pedaler.

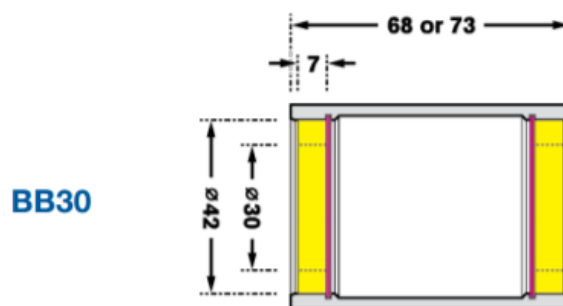


Fig. 4.2. Mides de l'estàndard de pedaler BB30 [6]

- Els suports posteriors del quadre -els que l'uneixen amb la roda i tot el sistema de canvis- tindran un diàmetre d'11 mm. Aquest diàmetre és un diàmetre comú en els eixos posteriors de les bicicletes de carretera. Aquesta peça, a més, s'ha decidit de fer-la tancada, és a dir sense la obertura necessària per a poder-hi encaixar la roda, ja que l'objectiu de l'estudi és calcular la resistència del quadre en general i no la d'aquest punt en concret, i el fet de crear aquesta peça oberta podria provocar grans tensions en aquesta regió tot impeding una bona anàlisi a la resta del quadre.



Un cop realitzats els estudis de resistència i un cop triats els models de rodes i el canvi de marxes que portaria incorporats la bicicleta, caldria redissenyar aquesta regió per tal de fer possible la subjecció de la roda tot reduint al màxim les tensions a les zones de subjecció amb la roda.

- El diàmetre de la boca d'entrada del seient s'ha establert de 32,6mm ja que és una mida estàndard que permet la utilització d'una gran quantitat de seients existents al mercat sense la necessitat d'utilitzar adaptadors.
- L'eix de la forquilla, eix a través del qual passa la forquilla que comunica la roda davantera amb el manillar, ha estat fixat en un diàmetre de 39,8mm per tal de ser compatible amb un gran nombre de forquilles i manillars del mercat.
- La separació entre els dos suports de la roda posterior s'ha fixat en 130mm que és la distància estàndard per al quadres de bicicleta de carretera.

4.2. Disseny

Per al disseny del quadre de bicicleta s'han agafat les dimensions del quadre de bicicleta de fibra de carboni Felt F FRD [7] talla 58. Aquesta és una bicicleta de fibra de carboni d'un cost de 3999€ del qual només s'ha disposat de les mides de l'esquelet, és a dir, les mides de separació entre rodes, l'altura de l'eix del pedaler... però no les dimensions, formes i seccions de les peces i tubs que formen el quadre.

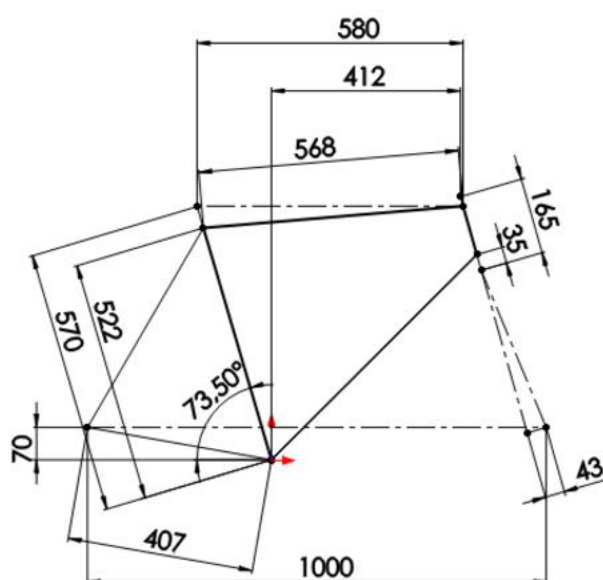


Fig. 4.3. Disseny lineal inicial del quadre amb cotes en mil·límetres (mm)

A partir d'aquestes dimensions, de les restriccions imposades anteriorment i tot establint una longitud de l'eix del pedaler de 68mm, que ve imposada per l'ús del pedaler BB30, s'ha creat un disseny inicial simple amb el qual s'han començat a realitzar els estudis que han de donar com a resultat un quadre millorat.

Aquest disseny inicial simple és un disseny tubular a partir de diferents tubs de secció constant acoblats de manera directa sens cap reforç ni arrodoniment a les unions.

A continuació es mostra una representació en perspectiva isomètrica en programa de CAD del quadre amb el disseny inicial simple obtingut; els plànols d'aquest disseny inicial es poden trobar a l'Annex A.



Fig. 4.4. Disseny del quadre inicial simple en perspectiva isomètrica

A les imatges següents es pot apreciar l'absència de reforços i arrodoniments a les unions dels diferents tubs:

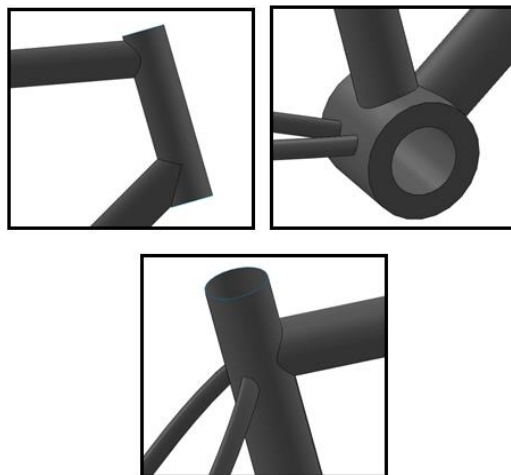


Fig. 4.5. Focalització en les unions no reforçades ni arrodonides del quadre inicial.



Un cop creat aquest disseny inicial simple s'han realitzat diversos anàlisis de resistència mecànica amb el programa Ansys Workbench, anàlisis que s'explicaran detalladament en els següents apartats, i s'ha vist que els principals punts de concentració de tensions eren les unions entre els diferents tubs i les beines superiors i inferiors, que són les quatre vares que uneixen els suports de la roda posterior amb el triangle principal de la bicicleta.

A partir de la informació obtinguda en les diferents anàlisis, s'ha modificat el disseny inicial per tal de reforçar els punts més febles indicats i augmentar-ne la resistència.

Aquesta optimització s'ha realitzat de manera iterativa tot aplicant modificacions als disseny i analitzant-ne els resultats amb el programari de simulació Ansys Workbench ja esmentat.

Aquesta optimització ha portat a:

- Reforçar les beines superiors i inferiors, modificant la seva curvatura i donant-les-hi una secció no constant.
- Arrodonir i reforçar totes les unions de les diferents parts del quadre.
- Redissenyar tota la part frontal del quadre on es troba l'eix de la forquilla, per tal que hi hagi una distribució millor de les tensions.

A continuació es mostra una representació en perspectiva isomètrica en programa de CAD del disseny final; els plànols d'aquest disseny final es poden trobar a l'Annex A.



Fig. 4.6. Disseny del quadre final en perspectiva isomètrica.

Tot seguit es mostra una comparativa de les unions del quadre final respecte les unions del quadre inicial.

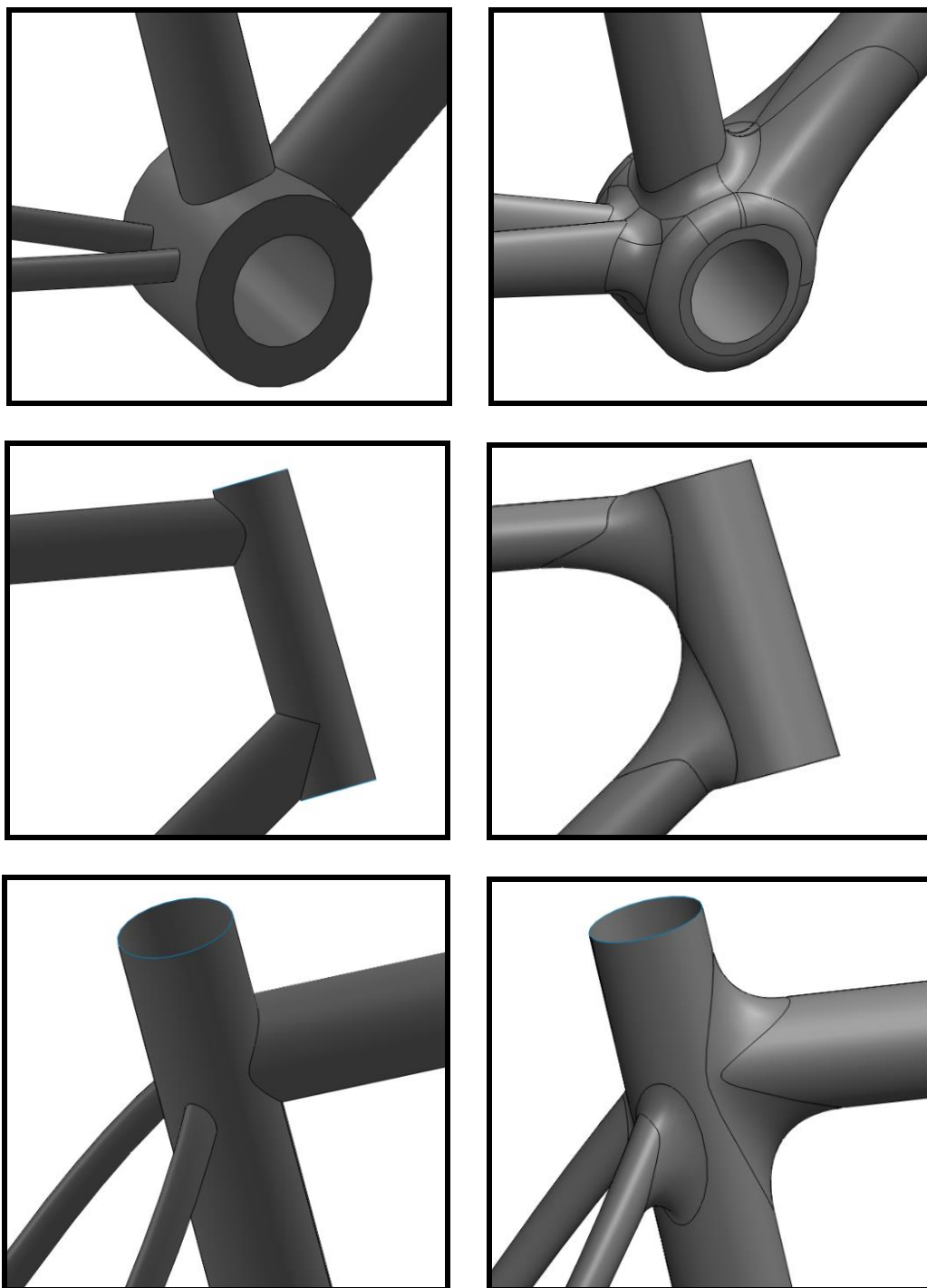


Fig. 4.7. Comparativa entre les unions del disseny inicial i les unions del disseny final.



4.3. Definició dels materials

La fibra de carboni utilitzada és una fibra d'un gruix de 0,0004m unidireccional amb les propietats mecàniques explicades anteriorment a les restriccions i l'alumini utilitzat en les simulacions és l'alumini estàndard que incorpora el programa Ansys amb les propietats exposades també a l'apartat de les restriccions.

Els quadres de fibra de carboni, tal com ja s'ha explicat, no estan fets d'una sola capa del compost sinó que estan fets a base de superposar diferents capes d'aquest material. Així doncs, i per tal de complir amb l'especificació de pes màxim establerta pel fabricant d'1,1kg, s'ha decidit solapar 5 capes de compost que sumen un gruix de 2mm constant en tot el quadre, cosa que comporta un pes total del quadre de 1,0853 kg.

Per tal d'aconseguir que el quadre tingui una bona reacció a l'efecte de forces independentment de quina sigui la seva direcció, s'ha decidit disposar les fibres en l'orientació següent:

Layer	Material	Thickness (m)	Angle (°)
(+Z)			
5	CF	0,0004	0
4	CF	0,0004	45
3	CF	0,0004	90
2	CF	0,0004	-45
1	CF	0,0004	0
(-Z)			

Fig. 4.8. Angles de disposició de les diferents capes de fibra de carboni.

Aquests angles fan referència a la superfície del quadre en cada punt prenent com a 0 graus la direcció paral·lela a l'eix del tub al que pertany el punt de la superfície. Aquesta disposició permet la obtenció d'unes prestacions en les diverses direccions similars a les que presenta un quadre confeccionat a partir de fibres bidireccionals però a un cost molt menor.

Pel que fa al quadre d'alumini, com que no es disposa del quadre de referència fet pels enginyers de Monty, s'ha assumit que aquest també compleix l'especificació del pes. Aquesta premissa ha estat agafada ja que el pes és un dels factors més rellevants en la classificació de les bicicletes carretera, i molts dels consumidors es decanten per un quadre o un altre en funció únicament del seu pes. Aquest fet, conegut per totes les empreses del sector, fa que sigui lògic pensar que els enginyers de Monty han centrat molts esforços en assolir un quadre que compleixi la seva pròpia especificació de pes màxim.

Aquest material, l'alumini, en ser un material isotròpic, presenta les mateixes propietats mecàniques sense importar en quina direcció es realitzin les mesures, cosa que ha permès que s'hagi definit compostat en una sola capa. El gruix d'aquesta capa, però, no és de 2mm com en el cas de la fibra de carboni ja que, com que la densitat d'aquest material és major, si el seu gruix fos de 2mm, el pes del quadre superaria el de l'especificació de pes màxim.

Així doncs, s'ha decidit establir que el gruix del quadre d'alumini sigui aquell que dona com a resultat el mateix pes que el del quadre de fibra de carboni, ja que permetrà, a més de complir les especificacions, igualar una característica tan important com és el pes, en els quadres de bicicleta i permetrà comparar de millor manera el rendiment dels dos materials.

Un cop presa la decisió de donar als dos quadres el mateix pes, s'ha procedit a calcular el gruix de quadre d'alumini.

$$\text{Volum quadre Alumini} = \frac{\text{Densitat fibra de carboni} \times \text{Volum quadre fibra de carboni}}{\text{Densitat Alumini}}$$

$$\text{Volum quadre Alumini Final} = \frac{1600 \times 6,7834e^{-4}}{2770}$$

$$\text{Volum quadre Alumini Final} = 3,918e^{-4} \text{m}^3 \rightarrow \text{Gruix quadre Alumini Final} = \mathbf{1,15524mm}$$

$$\text{Massa quadre Final} = \mathbf{1,0853Kg}$$

4.4. Simulacions amb el mètode dels elements finits

La realització de les múltiples simulacions per estudiar el comportament dels diferents dissenys davant de diferents accions externes va ser feta, com ja s'ha dit, mitjançant el programa Ansys Workbench. Aquest programa utilitza el mètode dels elements finits per a la realització dels seus càlculs.

4.4.1. Mètode dels elements finits

El mètode dels elements finits, o "Finite Element Method", és un mètode numèric que permet la resolució de problemes físics en geometries complexes. Aquest mètode proporciona uns resultats aproximats a problemes que altrament només podrien ser resolts mitjançant la construcció d'un prototip i realitzant un test real de la situació que es vol estudiar.



Malgrat que aquest mètode proporcioni uns resultats aproximats, permet la realització de molts estudis, modificacions i millores d'un disseny en base als resultats obtinguts en simulacions. Aquest fet comporta que la creació d'un prototip sigui necessària només a la fase final dels projectes -un cop ja han estat fetes la majoria de les modificacions i millores en els dissenys- per tal de comprovar i precisar els resultats obtinguts a les simulacions tot abaratint molt els costos de disseny i creació del producte.

El mètode dels elements finits consisteix en la divisió del sòlid estudiat (en aquest cas el quadre d'una bicicleta), del qual es desconeix/en la/es equació/ons diferencial/s que el defineix/en, en un conjunt finit d'elements units per nusos o nodes. Així, es converteix un cos continu en un model discret. Un cop obtingut aquest model discret que consisteix en una malla de nodes interconnectats entre ells, es procedeix a calcular els desplaçaments d'aquest nombre finit de nodes de tal manera que els desplaçaments a l'interior de cada element es podran definir en funció del desplaçament dels nodes que l'envolten.

Per fer-ho es crea la matriu de rigidesa que és una expressió matricial del conjunt d'equacions que defineixen el valor de cada variable incògnita d'un node en funció dels nodes del seu voltant. Així doncs, és evident que el nombre d'equacions que formen aquesta matriu és proporcional al nombre de nodes del sistema i al nombre d'incògnites. Un cop definides i acoblades entre elles aquestes equacions es pot prosseguir amb el càlcul dels desplaçaments ja que es disposa de tantes equacions com incògnites hi ha al sistema.

A partir d'aquest conjunt d'equacions, es poden calcular els desplaçaments de cada un dels nodes que formen la malla i a partir d'aquí, utilitzant mètodes d'interpolació, es pot conèixer de manera aproximada els desplaçaments dins de cada element. És clar, doncs, que com més petita sigui la mida de cada element major serà la precisió dels resultats obtinguts, ja que l'aproximació per interpolació requerida serà menor. Un cop coneguts aquests desplaçaments es poden calcular les tensions i les deformacions dins de cada element, essent aquestes també una aproximació de la realitat.

En geometries senzilles i petites aquest mètode és possible d'utilitzar de manera manual, però a mesura que es va treballant amb geometries més complexes que disposen d'un nombre major de nodes i d'equacions més complexes, es fa evident que aquest sistema només pot ser utilitzat ajudant-se d'eines de càlcul computacional, com és el cas del programa Ansys.

En aquest projecte, com que es treballa amb unes geometries molt complexes amb un gran nombre de nodes, el mètode dels elements finits ha estat utilitzat directament pel programa Ansys i només s'han estudiat els resultats finals d'aquest sense aprofundir en la marea en la que s'han realitzat aquests càlculs ja que l'objectiu del projecte és l'estudi de les deformacions i les tensions i no l'estudi del seu càlcul.

4.4.2. Simulacions

Tot i que només s'analitzen amb detall els resultats numèrics del disseny final del quadre, s'ha considerat interessant també mostrar els resultats numèrics del primer disseny simple, com a mostra de la millora en les prestacions que s'ha acabat assolint amb la millora del disseny.

Pel que fa als resultats gràfics, en aquest apartat es mostren els corresponents als dos quadres finals, el de fibra de carboni i el d'alumini.

Així doncs, en aquest apartat es mostraran els valors dels quatre models següents encara que de fet, només s'aprofundirà en l'estudi dels dos dissenys finals, marcats en negreta.

- Quadre Inicial d'Alumini
- **Quadre Final d'Alumini**
- Quadre Inicial de Fibra de Carboni
- **Quadre Final de Fibra de Carboni**

A l'hora d'elegir quines simulacions calia realitzar s'ha decidit estudiar primer de tot la normativa de la Unió Europea respecte als requeriments de seguretat i mètodes de test per a bicicletes de competició, la *EN 14781 "Racing bicycles - Safety requirements and test methods"*, que data del 2005 (es pot trobar adjunta aquesta normativa com a Annex B).

En aquesta normativa, al punt 4.8, es parla dels quadres de bicicleta i dels diferents tests de seguretat que s'han de realitzar. D'aquests tests, dos són d'impacte, dels quals un, el "Test d'impacte amb una massa caient", ha estat simulat ja que mostra la reacció del quadre davant d'un xoc frontal, situació probable en l'ús d'un quadre de bicicleta de carretera. L'altre, anomenat "Test d'impacte amb el quadre caient", no ha estat simulat ja que plateja una simulació poc probable a la vida real del quadre de carretera, un salt. Els altres dos són tests de fatiga, que pel fet de no disposar de la corba de fatiga S-N de la fibra de carboni i d'un equipament capaç de simular estudis transitoris amb un nombre molt elevat de cicles ni d'un prototip, aquests tests no han pogut ser estudiats. Malgrat això, aquests dos tests de fatiga impossibles de fer han proporcionat les bases de diversos tests que sí que s'han pogut fer i els valors de les forces que s'hi han aplicat. Aquests tests seran explicats a continuació. A més s'ha realitzat una simulació d'un dels 100000 cicles que s'han de fer per al "Test de fatiga amb forces de pedaleig" per tal de tenir una idea aproximada de com es comportaria el quadre durant un cicle d'aquest test de fatiga, el qual simula l'aplicació de les forces causades pel pedaleig d'un ciclista, abans de la possible o no ruptura del quadre.

Els quatre tests requerits per la normativa són els següents:



- Test d'impacte amb una massa caient
- Test d'impacte amb el quadre caient
- Test de fatiga amb forces de pedaleig
- Test de fatiga amb forces horitzontals

Finalment, doncs, s'ha decidit realitzar quatre tests diferents per tal d'estudiar el comportament dels quadres de fibra de carboni i alumini sota l'aplicació de diferents forces. Dos d'aquests han sigut dividits en dos subtests, i tots ells es mostren enumerats tot seguit.

- Test de rigidesa a flexió
 - o Test de rigidesa a flexió amb força de +600N
 - o Test de rigidesa a flexió amb força de -600N
- Test de rigidesa a torsió
 - o Test de rigidesa a torsió del triangle principal
 - o Test de rigidesa a torsió del triangle posterior
- Test de rigidesa a la pedalada
- Test d'impacte amb una massa caient

Un cop definides les diferents simulacions a realitzar, s'ha decidit prendre els resultats de la deformació màxima i les tensions a tracció, compressió i de cisalla màximes com a resultats a analitzar i com a valors amb els que es realitzaran les comparacions.

S'han pres aquests valors ja que, per una banda, la deformació màxima és una conseqüència directa de la rigidesa del quadre i per tant, com menor sigui la deformació major serà la rigidesa, que és un dels factors que es vol maximitzar. Per l'altra banda, pel que fa a les tensions a tracció, compressió i de cisalla màximes, s'ha decidit prendre-les ja que mostren els punts per on es produiria una fallada del quadre; la seva minimització implica que el quadre presenta una millor distribució de tensions i per tant una reducció de les probabilitats de fallada deguda a l'aplicació d'alguna força externa.

4.4.2.1. Test de rigidesa a flexió

Per a la realització d'aquest test s'ha agafat com a model el "Test de fatiga amb forces horitzontals" de la normativa de seguretat de la Unió Europea. Aquesta determina que per a la realització del test cal fixar l'extrem posterior del quadre, allà on aniria collada la roda del darrere, i s'han d'aplicar alternativament unes forces horitzontals de 600N i de -600N a l'extrem de la forquilla, allà on aniria fixada la roda davantera de la bicicleta.

Tal com permet la normativa europea, per tal que els constructors de quadres puguin realitzar els tests (pàg 43 punt 4.8.2.1 línia 3), en aquest test s'utilitzarà una barra massissa

d'acer en comptes d'una forquilla davantera.

En el test de fatiga de la Normativa Europea es determina que aquestes dues forces s'han d'anar aplicant alternativament durant 100000 cicles complets, però com que l'objectiu del nostre test és conèixer la rigidesa del quadre i no la seva possible fallada, el test es divideix en dos estudis estacionaris en un dels quals s'aplica una força constant de 600N i a l'altre una força també constant de -600N, ambdues a l'extrem de la barra d'acer que substitueix a la forquilla davantera en la direcció de l'eix imaginari que uneix les dues rodes de la bicicleta.

4.4.2.1.1 Test de rigidesa a flexió amb força de +600N

En aquesta part del test s'ha aplicat una força de +600N en la direcció paral·lela a l'eix x, tot prenent com a eix x l'eix que uneix l'extrem posterior del quadre amb l'extrem de la forquilla d'acer.

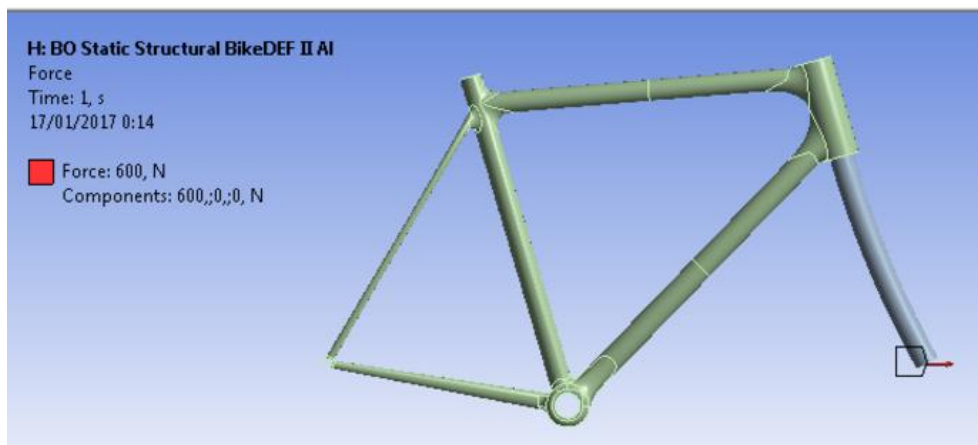


Fig. 4.9. Esquema de la simulació del test de rigidesa a flexió amb força de 600N

A l'hora de realitzar l'estudi en el disseny final, s'ha comprovat que les màximes concentracions de tensions a tracció eren a la juntura entre el tub inferior del triangle principal i el tub de la forquilla davantera i també s'ha vist que el punt on hi havia una major concentració de tensions a compressió era a la unió de les beines inferiors amb l'eix del pedaler i la unió d'aquest amb el tub del seient així que s'ha decidit introduir un refinat en aquestes dues regions per tal d'obtenir uns resultats més precisos. Aquest refinat ha estat aplicat tant per al model d'alumini com per al de fibra de carboni.



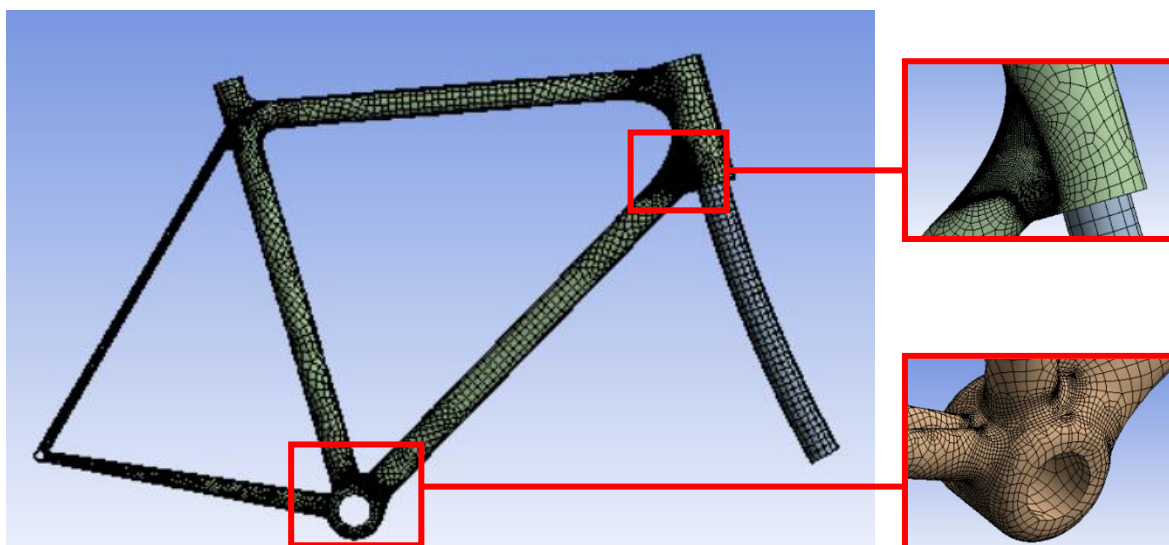


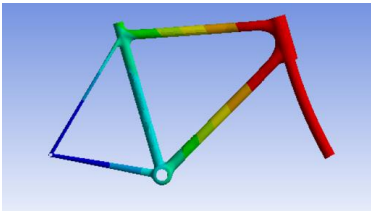
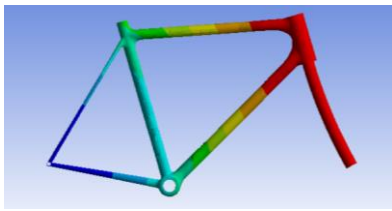
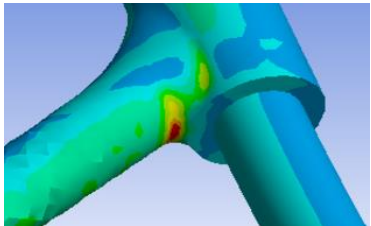
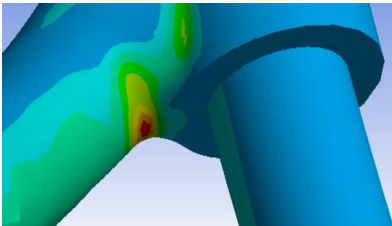
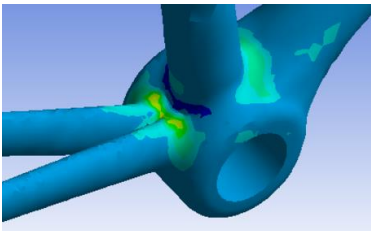
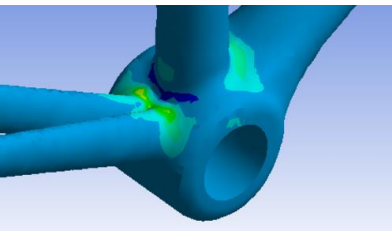
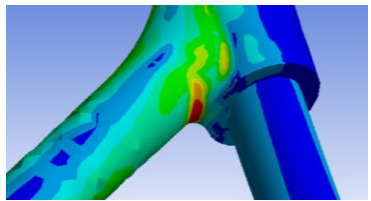
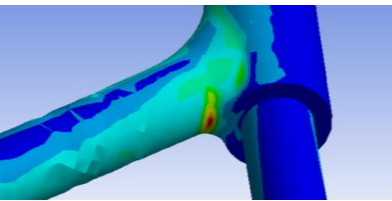
Fig. 4.10. Vista del mallat del disseny final després de realitzar el mallat i el refinat

Un cop fet el mallat s'ha procedit a realitzar la simulació per als models de fibra de carboni i alumini, tot extraient-ne els valors de deformació màxima, tensió a tracció màxima, tensió a compressió màxima i tensió de cisalla màxim.

D'aquest estudi se n'han pogut extreure tant resultats gràfics com resultats numèrics. A continuació es mostren els resultats gràfics de les simulacions per al disseny final de fibra de carboni i per al disseny final d'alumini, així com els resultats numèrics de les simulacions del disseny final en fibra de carboni i alumini, al costat dels obtinguts amb el primer disseny, que també han estat afegits per mostrar l'evolució que ha anat patint el disseny.

En els resultats numèrics han estat ressaltats els valors obtinguts amb el disseny final, que són els que s'han de prendre en consideració per estudiar el compliment o no de les especificacions.

La valoració dels resultats obtinguts és feta al final de l'apartat juntament amb els resultats de la simulació amb la mateixa força de 600N però sentit contrari.

	Disseny Final d'Alumini	Disseny Final Fibra de Carboni
Deformació total		
Tensions màximes a tracció		
Tensions màximes a compressió		
Tensions màximes de cisalla		

Taula 4.1. Visualització dels resultats de la simulació en els dos quadres finals



Test de rigidesa a flexió amb força de +600N	Deformació màxima (m)	Tensió màxima a tracció (Pa)	Tensió màxima a compressió (Pa)	Tensió màxima de cisalla (Pa)
Quadre Inicial Alumini	9,9893e ⁻³ m	3,2416e ⁸ Pa	3,5178e ⁷ Pa	1,675e ⁸ Pa
Quadre Final Alumini	7,6674e⁻³ m	2,2676e⁸ Pa	3,2055 e⁷ Pa	1,1045e⁸ Pa
Quadre Inicial Fibra de Carboni	6,9710e ⁻³ m	2,0133e ⁸ Pa	1,9761e ⁷ Pa	1,0057e ⁸ Pa
Quadre Final Fibra de Carboni	4,9867e⁻³ m	1,7848e⁸ Pa	5,8796e⁶ Pa	8,8091e⁷ Pa

Taula. 4.2. Resultats numèrics de les simulacions del test de flexió amb una força horitzontal de 600N

La valoració d'aquests resultats es troba al final d'aquest test, juntament amb la valoració de la simulació en la què s'ha substituït la força de +600N per una de -600N.

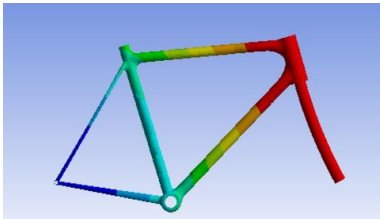
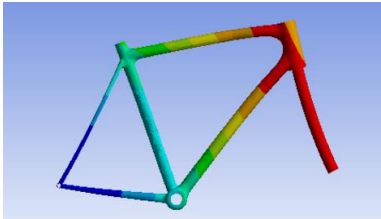
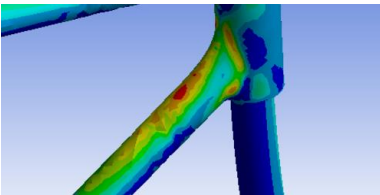
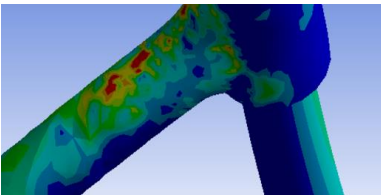
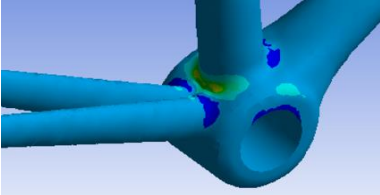
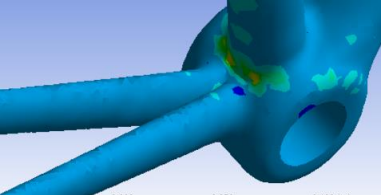
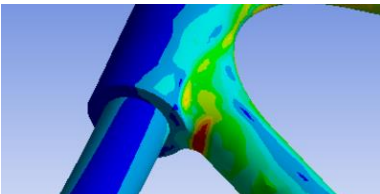
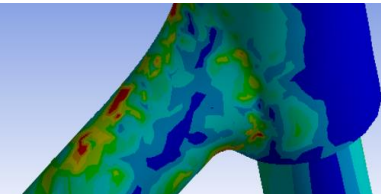
4.4.2.1.2 Test de rigidesa a flexió amb força de -600N

En aquesta segona part del test, s'ha substituït la força de +600N per una de -600N en la mateixa direcció.



Fig. 4.11. Esquema de la simulació del test de rigidesa a flexió amb força de -600N

S'ha vist que les màximes tensions a tracció, de nou, apareixien a la juntura entre el tub inferior del triangle principal i el tub de la forquilla davantera però a la part superior d'aquest, i que les majors tensions a compressió es trobaven també a la unió de les beines inferiors amb l'eix del pedaler i la unió d'aquest amb el tub del seient; i com que aquesta regió ja estava dins del refinat, aquest no s'ha modificat. Posteriorment s'ha procedit a fer la simulació, els resultats de la qual apareixen a continuació, gràficament per als dos quadres finals i numèricament per a aquests dos més per als dos quadres fets amb el disseny inicial simple.

	Disseny Final Alumini	Disseny Final Fibra de Carboni
Deformació total		
Tensions màximes a tracció		
Tensions màximes a compressió		
Tensions màximes de cisalla		

Taula 4.3. Visualització dels resultats de la simulació en els dos quadres finals



Test de rigidesa a flexió amb força de -600N	Deformació màxima (m)	Tensió màxima Tracció (Pa)	Tensió màxima Compressió (Pa)	Tensió de cisalla màxima (Pa)
Quadre Inicial Alumini	9,9779e ⁻³ m	2,9761e ⁸ Pa	5,8587e ⁷ Pa	1,682e ⁸ Pa
Quadre Final Alumini	7,5984e⁻³ m	2,3116e⁸ Pa	1,6511e⁷ Pa	1,1009e⁸ Pa
Quadre Inicial Fibra de Carboni	6,9254e ⁻³ m	1,878e ⁸ Pa	2,2557e ⁷ Pa	1,0043e ⁸ Pa
Quadre Final Fibra de Carboni	4,9851e⁻³ m	1,1995e⁸ Pa	4,3383e⁶ Pa	8,8113e⁷ Pa

Taula 4.4. Resultats numèrics de les simulacions del test de flexió amb una força horitzontal de -600N

Un cop estudiada la flexió per als diferents quadres, s'ha procedit a analitzar els valors obtinguts. Per fer-ho s'han realitzat estudis comparatius que permetin veure les variacions en les prestacions del quadre final de fibra de carboni respecte al d'alumini. Així mateix, tal com s'ha fet a les taules de resultats, també s'ha decidit afegir els resultats del disseny inicial però sense donar-los rellevància tot podent veure la progressió de les prestacions que hi ha hagut durant el disseny del quadre final.

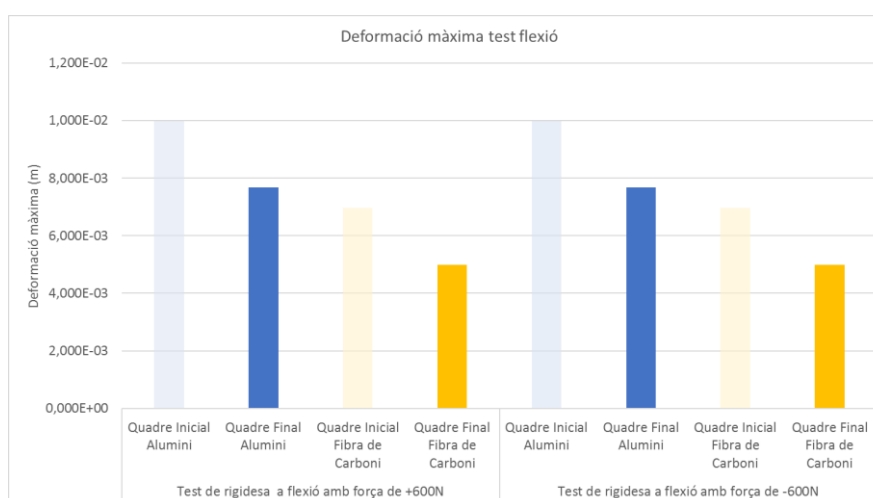


Fig. 4.12. Gràfica que mostra les deformacions màximes dels diferents quadres per al test de flexió

Pel que respecta a la deformació màxima, gràficament s'ha pogut observar que la major deformació tant si s'aplica una força de +600N com si se n'aplica una de -600N i sigui quin sigui el material del quadre, aquesta es concentra a la part davantera del quadre. Aquest resultat era d'esperar ja que la part posterior del quadre està fixada i és la part davantera ressaltada en vermell la que pateix un major moment flector causat per les forces externes cosa que acaba provocant una major deformació en aquesta regió. Quantitativament, aquesta deformació ha sigut quasi idèntica en les dues simulacions per a cada un dels quadres en les que s'ha pogut observar que la fibra de carboni aporta al quadre una disminució d'un 35% en la seva deformació màxima.

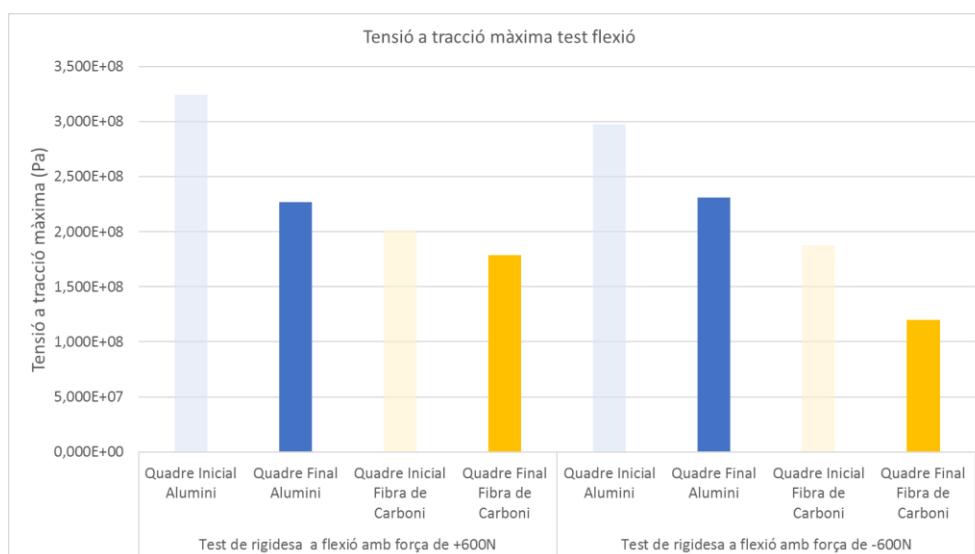


Fig. 4.13. Gràfica que mostra les tensions màximes a tracció dels diferents quadres per al test de flexió

Pel que fa a la tensió màxima a tracció, s'ha pogut observar que per als dos materials i les dues simulacions, aquestes es concentraven a la unió entre el tub inferior del triangle principal i el tub de la forquilla. A més s'ha vist que en ambdós simulacions l'ús de la fibra de carboni suposava una reducció de les tensions a tracció màximes d'un 21% en la simulació amb una força de +600N i d'un 48% en la simulació amb la força de -600N.



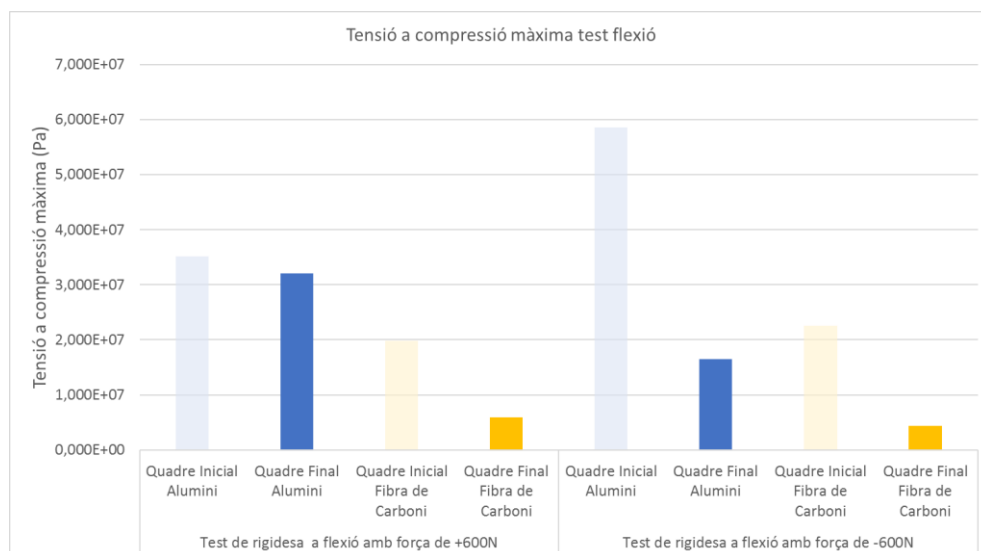


Fig. 4.14. Gràfica que mostra les tensions màximes a compressió dels diferents quadres per al test de flexió

Respecte a les tensions màximes a compressió, s'ha vist que aquestes es concentraven sobretot a la unió de les beines inferiors amb el suport del pedaler per als dos quadres, tant si s'ha aplicat la força de +600N o la de -600N.

Numèricament també s'ha pogut veure que en aquest test les tensions a compressió eren molt menors a les tensions màximes a tracció, essent les del quadre de fibra de carboni entre un 73% i un 81% inferiors a les de l'alumini.

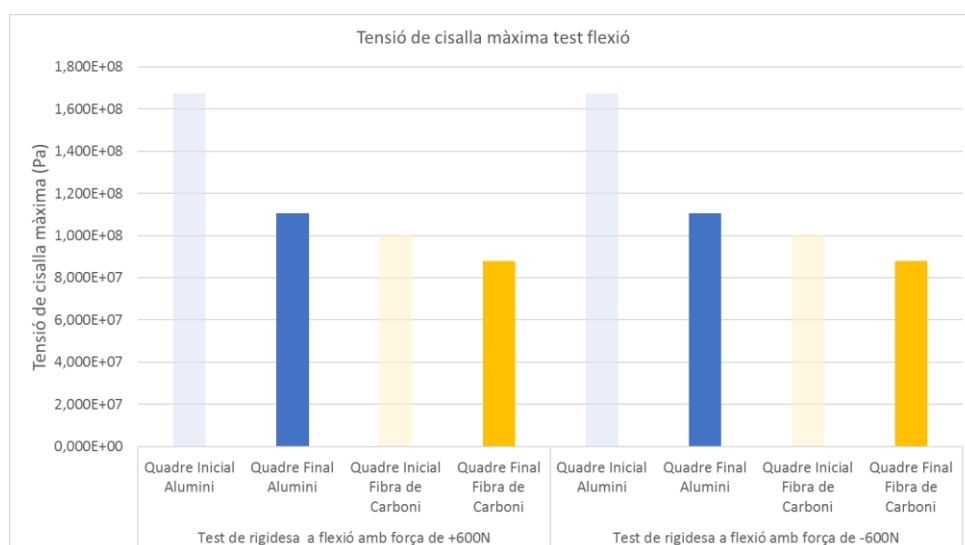


Fig. 4.15. Gràfica que mostra les tensions màximes de cisalla dels diferents quadres per al test de flexió

Respecte a les tensions de cisalla màximes, gràficament es pot observar que les zones d'aparició d'aquestes tensions màximes poden variar en funció del material. Això és degut a que, malgrat que el solapament de les diferents capes de fibra de carboni disposada en diferents angles ha permès assolir una reacció similar a les possibles tensions normals que puguin aparèixer en el quadre, aquesta variació en la orientació no afecta en la direcció perpendicular a la direcció de les diverses capes de fibres solapades tot comportant que respecte a les tensions de cisalla la fibra no respongui de manera similar a l'alumini.

Numèricament es pot observar el seu valor és quasi el mateix.

Així i tot, es pot observar que l'ús de la fibra de carboni redueix les tensions en un 20% respecte a l'ús de l'alumini en aquests tests.

4.4.2.2. Test de rigidesa a torsió

L'objectiu d'aquest test és estudiar la rigidesa del quadre quan se li aplica un moment flector en algun dels tubs i per tant veure com reacciona el quadre en rebre forces perpendiculars al seu eix.

A l'hora de dissenyar aquest test s'ha vist que hi havia dues maneres clares d'estudiar la rigidesa a torsió. En una d'elles l'estudi, i per tant les forces aplicades que provocaran el moment flector, es centraria en el triangle principal del quadre, i a l'altre l'estudi es concentraria en el triangle secundari o posterior del quadre, el que formen les beines amb el tub del seient.

4.4.2.2.1 Test de rigidesa a torsió del triangle principal

En aquest test s'ha decidit fixar la forquilla davantera del quadre i aplicar forces d'igual magnitud i direcció contrària, una a l'extrem superior del tub del seient i l'altre a l'eix del pedalier. Això provocarà un moment flector en el tub del seient que, en estar fixada la forquilla, provocarà que el quadre es deformi en la direcció en la que s'han aplicat les forces. S'ha establert que la magnitud de cada una de les forces aplicades és de 300N ja que així, en haver-hi una diferència de 600N entre les dues forces, es podrà comparar més fàcilment amb la reacció del quadre respecte de les forces paral·leles al seu eix de la simulació de flexió explicada amb anterioritat. A continuació es mostra un esquema de la simulació realitzada:



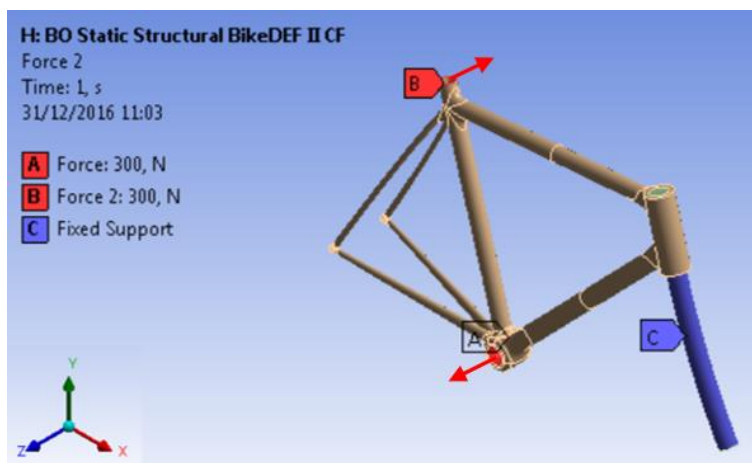


Fig. 4.16. Esquema de la simulació del test de rigidesa a torsió del triangle principal del quadre amb forces de 300N

S'ha vist que al disseny final la zona de màxima concentració de tensions, tant a tracció com a compressió, és la unió del tub inferior amb el tub de la forquilla i és en aquesta regió que s'ha aplicat el refinat.

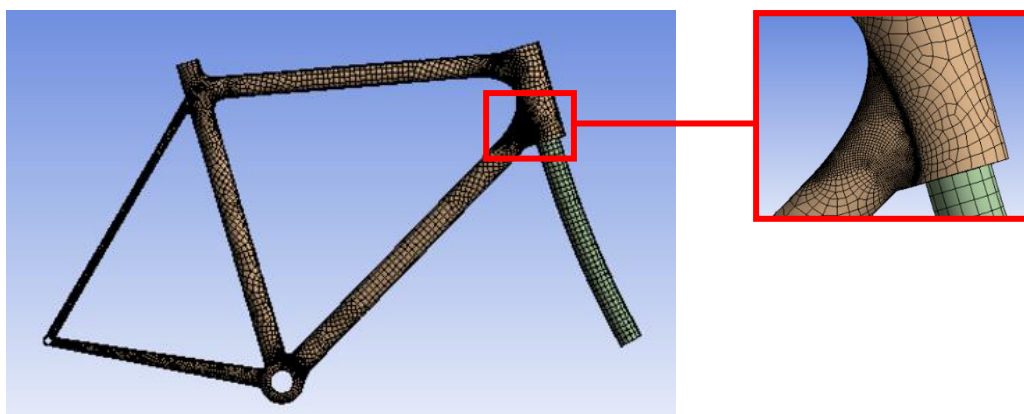
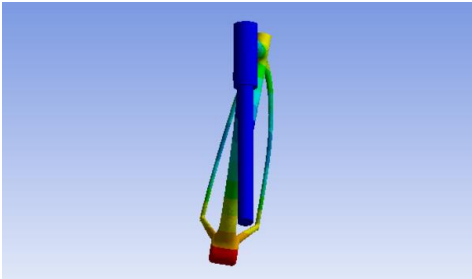
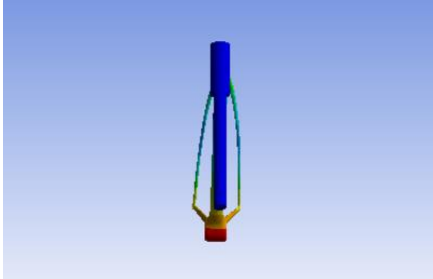
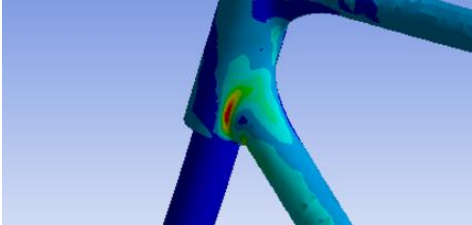
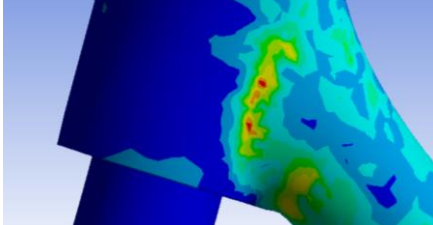
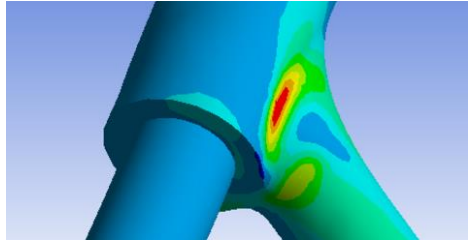
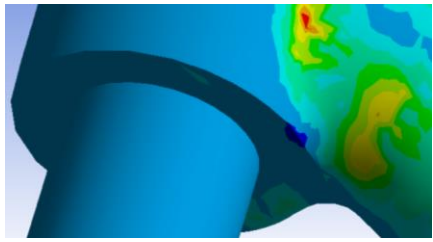
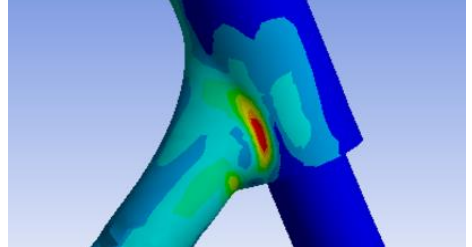
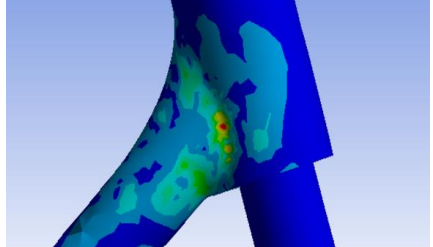


Fig. 4.17. Vista del mallat del disseny final després de realitzar el mallat i el refinat

El fet de que la zona de màximes tensions de tracció, compressió i cisalla sigui la mateixa que la zona de màxima tensió a tracció i cisalla de l'estudi de flexió, pot portar a pensar que aquesta pot ser la zona de màxima concentració de tensions, sigui quina sigui la direcció de les forces que s'apliquin al quadre.

Tot seguit es mostren els resultats gràfics de les simulacions per als dos quadres finals estudiats i a continuació també es mostren els resultats numèrics de d'aquestes simulacions al costat del resultats obtinguts amb el primer disseny simple.

	Disseny Final Alumini	Disseny Final Fibra de Carboni
Deformació total		
Tensions màximes a tracció		
Tensions màximes a compressió		
Tensions màximes de cisalla		

Taula 4.5. Visualització dels resultats de la simulació en els dos quadres finals



Test de rigidesa a torsió triangle principal	Deformació màxima (m)	Tensió màxima Tracció (Pa)	Tensió màxima Compressió (Pa)	Tensió de cisalla màxima (Pa)
Quadre Inicial Alumini	0,014589 m	4,6034e ⁸ Pa	7,5125e ⁷ Pa	2,2996e ⁸ Pa
Quadre Final Alumini	0,014315 m	3,3778e⁸ Pa	7,2077e⁷ Pa	1,7216e⁸ Pa
Quadre Inicial Fibra de Carboni	0,0088643 m	2,9286e ⁸ Pa	1,6491e ⁷ Pa	1,4642e ⁸ Pa
Quadre Final Fibra de Carboni	0,0085884 m	2,091e⁸ Pa	1,4546e⁷ Pa	1,2212e⁸ Pa

Taula. 4.6. Resultats numèrics de les simulacions del test de de torsió del triangle principal del quadre

Gràficament es pot observar com la deformació que pateix el quadre d'alumini és molt major que la que pateix el quadre de fibra de carboni i que les majors tensions tenen lloc, sigui quin sigui el material, i sigui quina sigui la tensió observada, a la unió entre el tub inferior del triangle principal i el tub de la forquilla.

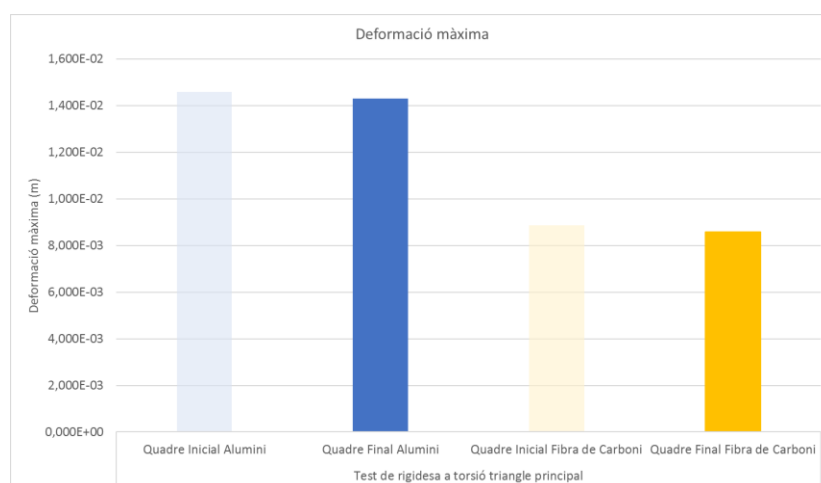


Fig. 4.18. Gràfica que mostra les deformacions màximes dels diferents quadres per al test de torsió del triangle principal

En aquesta gràfica es pot observar que l'ús de fibra de carboni comporta una millora en termes de minimització de les deformacions màximes del 40% respecte a l'ús de l'alumini. Així mateix és interessant destacar que per aquest test, l'optimització del disseny no ha comportat una millora gaire significativa respecte al resultats que s'havien obtingut amb el primer disseny simple. Pel que fa a la regió que pateix una màxima deformació, en ambdós estudis ha sigut la regió del pedaler la que ha patit una major deformació. Aquests resultats són coherents ja que en aquesta regió és on s'ha aplicat una de les dues forces, i aquesta regió dista més de les zones més fixes del quadre que l'altre punt d'aplicació de força. La major distància del punt fix fa que els moments en aquesta regió siguin majors i que per tant la deformació també ho sigui.

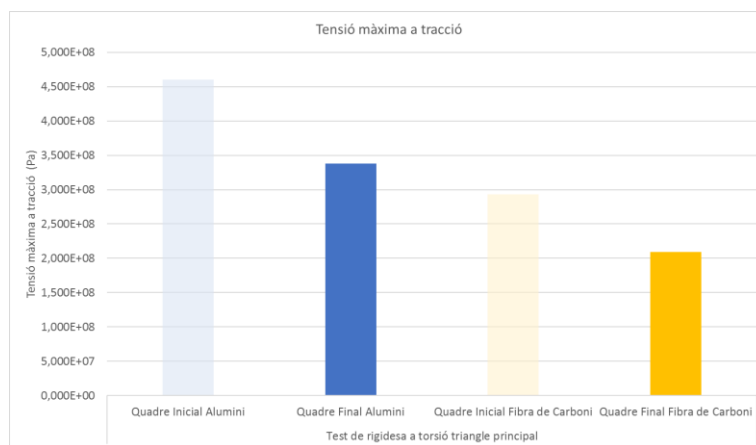


Fig. 4.19. Gràfica que mostra les tensions màximes a tracció dels diferents quadres per al test de torsió del triangle principal

Respecte a les tensions màximes a tracció cal destacar que aquestes s'han vist reduïdes en un 38% respecte a les obtingudes usant com a material l'alumini.

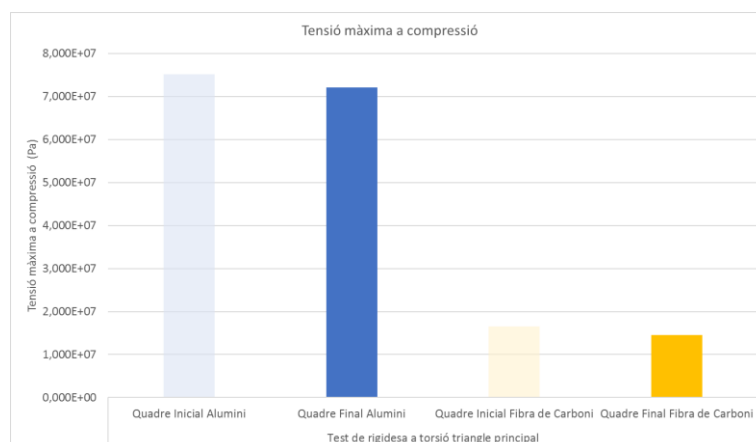


Fig. 4.20. Gràfica que mostra les tensions màximes a compressió dels diferents quadres per al test de torsió del triangle principal



Pel que fa a les tensions màximes a compressió, es pot observar que l'ús de la fibra de carboni suposa una reducció de fins al 80% en les tensions màximes a compressió. També s'observa que aquestes depenen poc del disseny, ja que des del disseny inicial simple fins al final aquestes han variat poc.

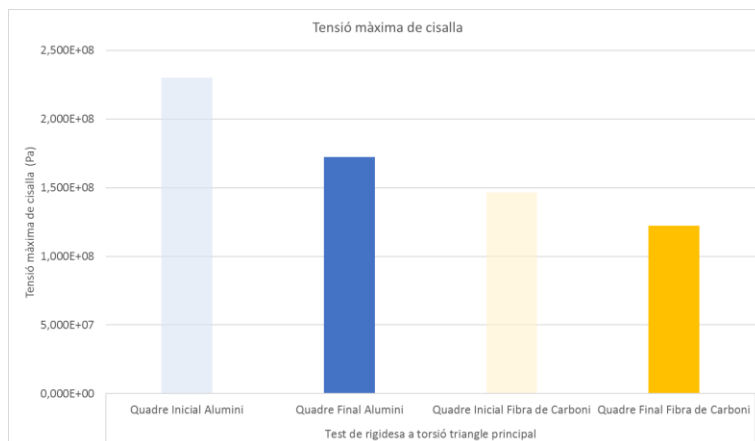


Fig. 4.21. Gràfica que mostra les tensions màximes de cisalla dels diferents quadres per al test de torsió del triangle principal

Respecte a les tensions màximes de cisalla, aquestes tenen lloc, com ja s'ha dit abans a la unió del tub inferior del quadre amb el tub de la forquilla indistintament del material emprat. El seu valor numèric però, sí que presenta diferències en la tensió màxima del quadre de fibra de carboni essent un 29% inferior a la del quadre d'alumini.

4.4.2.2 Test de rigidesa a torsió del triangle posterior

En aquest part del test s'ha canviat el punt de fixació per l'extrem posterior del quadre i s'ha deixat lliure la forquilla davantera tal com es mostra en l'esquema següent de la simulació.

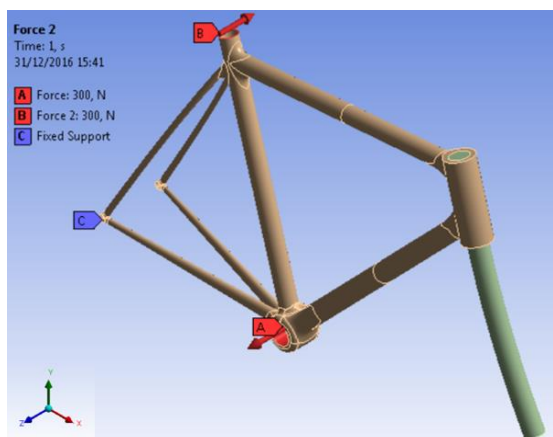


Fig. 4.22. Esquema de la simulació del test de rigidesa a torsió del triangle posterior del quadre amb forces de 300N

S'ha vist que la major concentració de tensions apareixia a les unions entre les beines superiors i les inferiors amb l'eix de la roda posterior i és allà on s'ha aplicat un refinat per tal d'obtenir un mallat més fi.

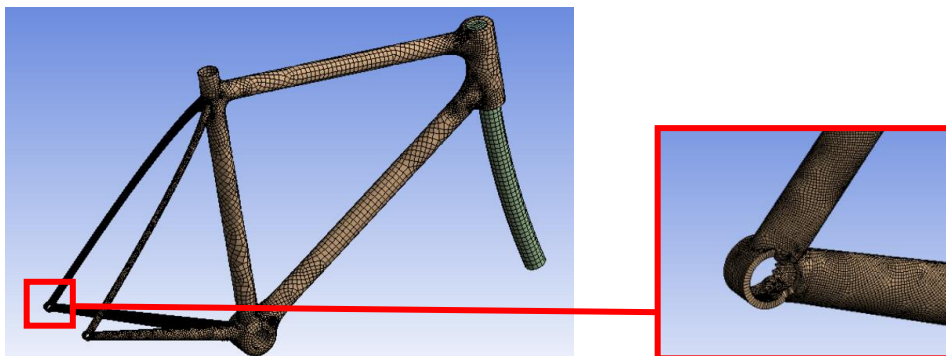
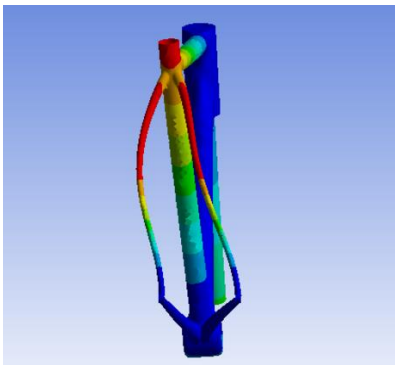
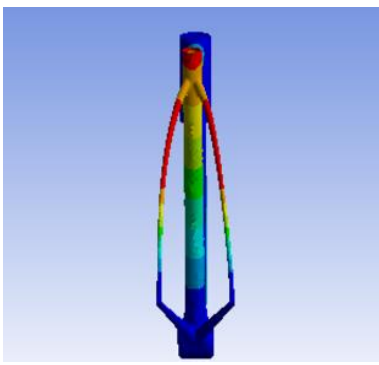
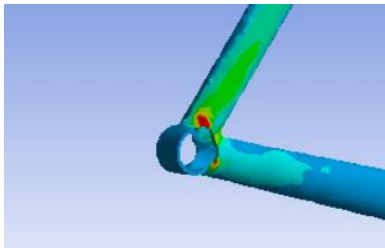
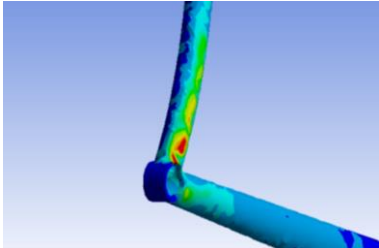
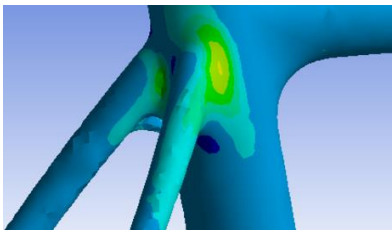
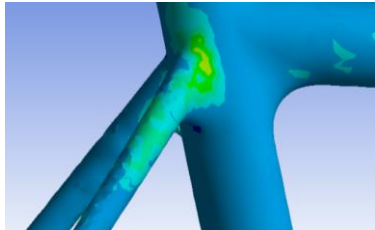
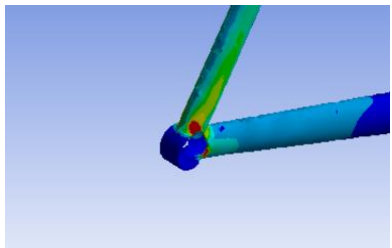
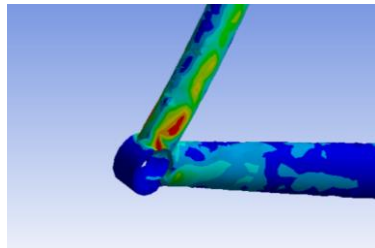


Fig. 4.23. Vista del mallat del disseny final després de realitzar el mallat i el refinat.

Després del mallat s'ha prosseguit amb la realització de les simulacions i l'obtenció dels resultats tant gràfics com numèrics que es mostren a continuació.

	Disseny Final Alumini	Disseny Final Fibra de Carboni
Deformació total		
ensions màximes a tracció		



	Disseny Final Alumini	Disseny Final Fibra de Carboni
Tensions màximes a compressió		
Tensions màximes de cisalla		

Taula_4.7_ Visualització dels resultats de la simulació en els dos quadres finals

Test de rigidesa a torsió triangle posterior	Deformació màxima (m)	Tensió principal màxima Tracció (Pa)	Tensió principal màxima Compressió (Pa)	Tensió de cisalla màxima (Pa)
Quadre Inicial Alumini	0,0097387 m	5,9136e ⁸ Pa	1,9377e ⁸ Pa	2,9871e ⁸ Pa
Quadre Final Alumini	0,0074104 m	3,816e⁸ Pa	2,9067e⁷ Pa	1,9153e⁸ Pa
Quadre Inicial Fibra de Carboni	0,0050881 m	3,0934e ⁸ Pa	3,4392e ⁷ Pa	1,6208e ⁸ Pa
Quadre Final Fibra de Carboni	0,0043314 m	2,3853e⁸ Pa	9,5407e⁶ Pa	1,2736e⁸ Pa

Taula_4.8_ Resultats numèrics de les simulacions del test de de torsió del triangle posterior del quadre

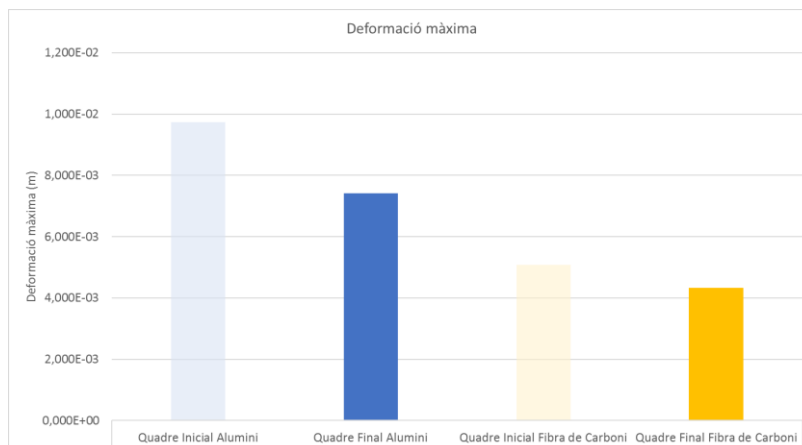


Fig. 4.24. Gràfica que mostra les deformacions màximes dels diferents quadres per al test de torsió del triangle posterior

Pel que fa a les deformacions, es pot observar que els resultats d'aquest test quadren amb els del test de flexió del triangle principal ja que en ambdós casos, la deformació màxima apareix en una de les dues regions d'aplicació de les forces, i en concret en aquella en que major és la distància respecte a la zona fixada. En el cas anterior la deformació màxima apareixia a la zona que envolta l'eix del pedaler i en aquest cas la deformació màxima té lloc a la boca del seient és a dir a l'extrem superior del tub del seient. També es pot observar que la regió de màxima tensió és independent de quin material s'hagi utilitzat i per tant es pot afirmar que només depèn del disseny.

Numèricament es veu que l'ús de la fibra de carboni comporta una reducció en les deformació màxima d'un 40% respecte al quadre d'alumini.

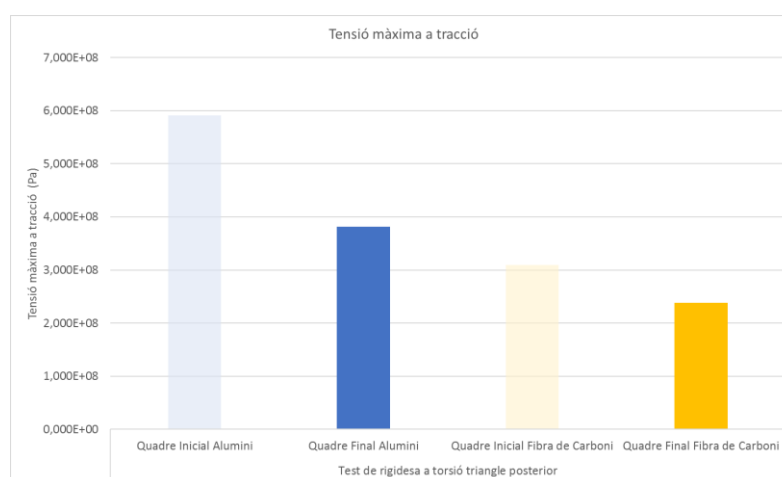


Fig. 4.25. Gràfica que mostra les tensions màximes a tracció dels diferents quadres per al test de torsió del triangle posterior



Es pot observar que per a aquest test la zona de majors concentracions de tensions, tant de tracció, com de cisalla, ha sigut la unió de les beines amb el suport de la roda posterior. Aquests resultats són coherents amb els obtinguts amb el test de torsió del triangle principal ja que en aquell, les màximes tensions apareixien entre la part del quadre que es trobava més fixada i el tub que uneix aquesta part amb la zona amb una major deformació. Quantitativament s'ha pogut observar que l'ús de la fibra de carboni ha comportat una reducció d'un 37% pel que fa a la tensió màxima a tracció.

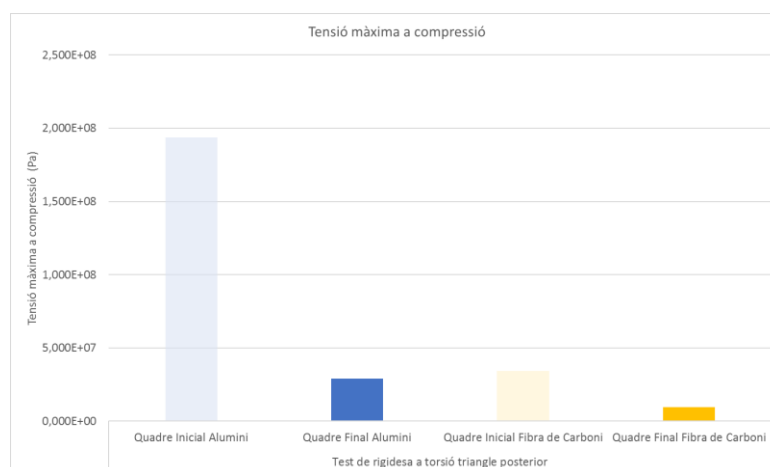


Fig. 4.26. Gràfica que mostra les tensions màximes a compressió dels diferents quadres per al test de torsió del triangle posterior

Respecte a les tensions de compressió s'ha pogut observar que la regió amb unes majors tensions és la unió entre les beines superiors i el tub del seient, essent aquestes molt inferiors a les tensions màximes a tracció. Respecte als materials, el quadre de fibra de carboni presenta una reducció de la tensió màxima d'un 67%.

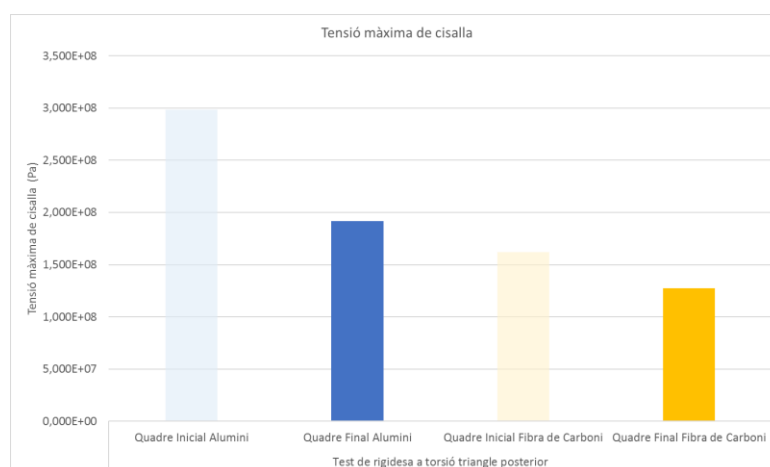


Fig. 4.27. Gràfica que mostra les tensions màximes de cisalla dels diferents quadres per al test de torsió del triangle posterior

Als resultats gràfics, tal com ja s'ha comentat, les tensions màximes de cisalla s'observen a la unió de les beines superiors amb el tub del seient cosa que concorda amb el test de torsió del triangle principal. També es pot observar que el quadre de fibra de carboni presenta uns millors resultats que el d'alumini, tot presentant una reducció de la tensió màxima de cisalla d'un 34%.

Per tal de fer una valoració més general dels tests en règim estacionari anteriors, s'ha decidit fer la mitjana del resultats obtinguts en cada test per als paràmetres estudiats per als dos quadres finals, el d'alumini i el de fibra de carboni. Aquests resultats no són analitzables aïlladament ja que són fruit d'una mitjana dels valors en diferents tests independents entre ells, però si que poden valorar-se en termes comparatius d'un quadre respecte l'altre.

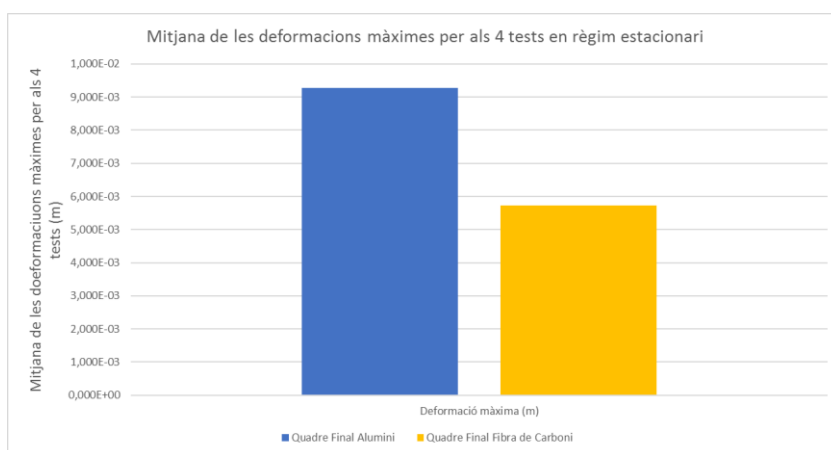


Fig. 4.28. Gràfica que mostra la mitjana de les deformacions màximes per als quatre tests en règim estacionari dels diferents quadres

En aquesta gràfica es pot observar que de mitjana el quadre de fibra de carboni aporta una reducció de la deformació màxima d'un 38% respecte al quadre d'alumini per als tests en règim estacionari.



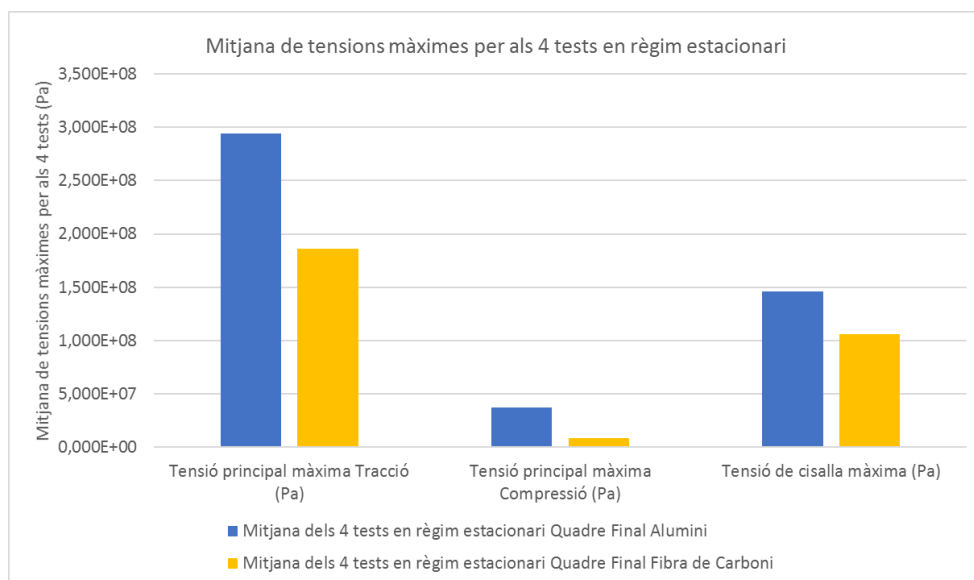


Fig. 4.29. Gràfica que mostra la mitjana de les tensions màximes per als quatre tests en règim estacionari dels diferents quadres

En aquesta gràfica es pot observar que amb caràcter general, la fibra de carboni aporta una reducció de tensions internes respecte a l'alumini, tant si són de tracció com de compressió o de cisalla. Més concretament aporta una reducció d'un 37% de les tensions màximes de tracció, d'un 77% en les tensions màximes a compressió i d'un 27% en les tensions màximes de cisalla. Com que les majors tensions que apareixen en el quadre són, per a tots els tests, les tensions màximes a tracció, es pot afirmar que en caràcter general el quadre de fibra de carboni ha comportat una reducció de les tensions internes màximes d'un 37%.

4.4.2.3. Test de rigidesa a la pedalada

Un cop estudiada la rigidesa dels diferents quadres a flexió i torsió s'ha volgut estudiar la rigidesa dels quadres en la situació en la que treballarien normalment que és sota la força imposada per un ciclista al pedalar.

Per a la creació d'aquesta simulació s'ha agafat com a base el test de fatiga amb forces de pedaleig present a la normativa europea.

En aquest test es fixa el quadre i la forquilla de la bicicleta (en aquest cas la forquilla

massissa d'acer) pels dos punts on anirien collades les rodes i es munta un dispositiu substitutori dels pedals i de la cadena a l'eix del pedaler. Aquest dispositiu simula dos pedals col·locats en un angle de -45° respecte l'eix horitzontal que uneix les dues rodes, i la cadena de la bicicleta és substituïda una barra sòlida que uneix el pedal dret amb l'eix de la roda posterior. El test consisteix en aplicar alternativament una força de 1100N en cada pedal amb un angle de $7,5^\circ$ respecte la vertical i orientada cap a la direcció en la que es troba el quadre, fins a assolir 100000 cicles complets. A continuació es mostra la representació gràfica del test de la normativa europea.

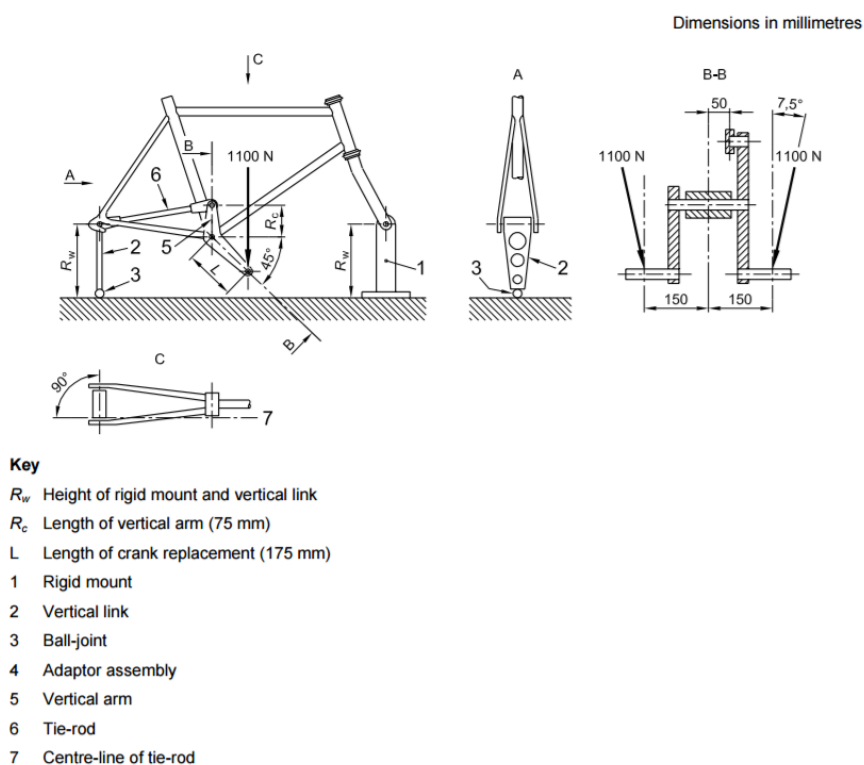


Fig. 4.30. Esquema del test de fatiga amb forces de pedaleig de la normativa europea

Tal com ja s'ha explicat anteriorment, aquest test de fatiga no s'ha pogut realitzar pel fet que no es disposa de la corba de fatiga de la fibra de carboni utilitzada ni d'un prototip. Però aquest test ha permès determinar la manera d'estudiar la reacció dels quadres sota l'acció de la força d'una pedalada. S'ha decidit estudiar la resposta dels quadres a la realització d'un únic cicle de pedaleig, és a dir, a l'aplicació d'una força de 1100N amb un angle de $7,5^\circ$ respecte la vertical i orientada cap a la direcció en la que es troba el quadre en un pedal i posteriorment l'aplicació de la força a l'altre pedal.



Per a la creació d'aquesta simulació, s'han hagut de crear les dues peces substitutòries dels pedals i la cadena i s'ha decidit que aquestes dues peces fossin massisses i d'acer ja que a la normativa europea s'especificava que l'adaptador havia de ser fort i rígid. A continuació es pot veure una representació gràfica de les dues peces i del muntatge complet; es podent trobar els plànols d'ambdues peces així com els de la forquilla d'acer a l'Annex A.

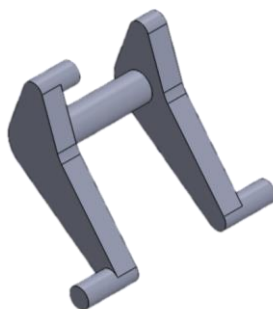


Fig. 4.31. Peça substitutòria pedals

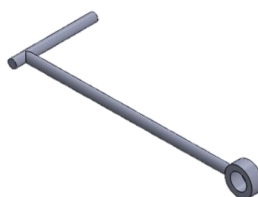


Fig. 4.32. Peça substitutòria cadena



Fig. 4.33. Muntatge test simulació pedaleig.

A l'hora de realitzar el test, aquest s'ha hagut de fer amb un anàlisi transitori ja que les forces aplicades en el model varien all llarg del temps. Per al programa, aquest tipus d'anàlisi suposen una dificultat de càlcul molt major i en conseqüència un temps de càlcul també molt major i, a més, ambdós factors es veuen incrementats en funció del nombre de subpassos o "substeps" amb els que es desitgi dividir la simulació. Inicialment es va decidir dividir l'estudi en 20 "substeps" per tal d'obtenir resultats numèrics de 20 instants del transitori, però aquest estudi requeria una potencia computacional de la que no es disposava i el programa era incapaç d'executar els càlculs. Aquest nombre es va anar reduint sempre a valors múltiples de 4 ja que així s'obtindrien resultats en els instants d'aplicació màxima de cada força. Inicialment es va reduir a 16, després a 12, posteriorment a 8 però com que el programa seguia sense poder realitzar els càlculs finalment es va reduir l'estudi a 4 subpassos que és el nombre mínim de subpassos en el que es pot dividir el cicle complet. I aquest estudi sí que va poder ser realitzat. Tal com s'ha dit, un cicle complet es pot dividir en 4 instants que són els següents:

- Instant 0: Repòs inicial
- Instant 1: Aplicació màxima de la força 1
- Instant 2: Repòs
- Instant 3: Aplicació màxima de la força 2
- Instant 4: Repòs

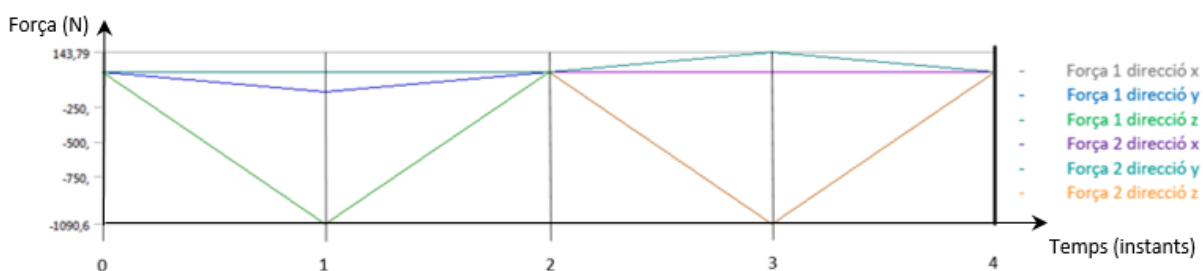


Fig. 4.34. Gràfic que mostra els valors de les forces 1 i 2 en els diferents instants de la simulació.



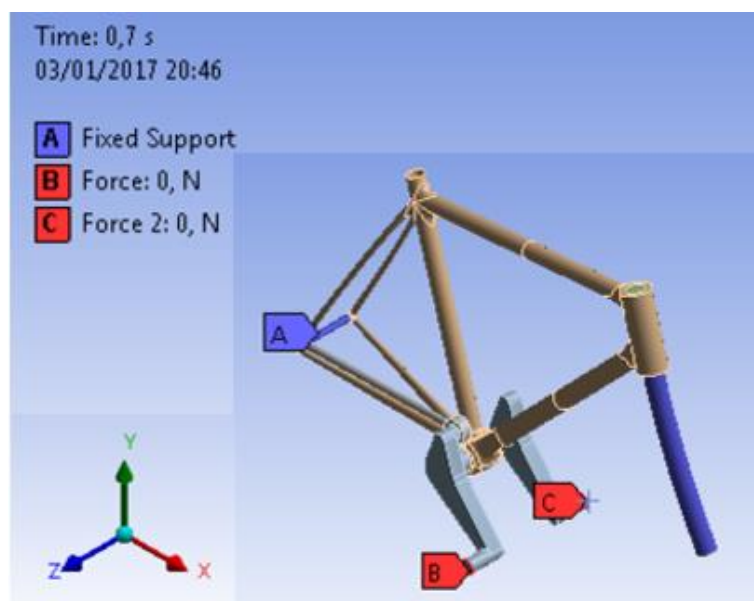


Fig. 4.35. Representació gràfica de la simulació així com els punts d'aplicació de la força 1 (punt B) i de la força 2 (Punt C)

Per tal de determinar el temps total del cicle, s'ha agafat com a referència una cadència mitja d'un ciclista professional, que està a l'entorn de les 85-90 RPM que equival un període d'entre 0,70588 i 0,6666 segons per cicle, i d'aquest interval s'ha triat el temps de 0,7 segons/cicle.

Per tant, s'ha decidit realitzar una simulació de 0,7 segons en què a l'instant 0s el model estarà en repòs sense rebre l'efecte de cap força, a l'instant 0,175s s'estarà aplicant una força en Newtons de components (0; -1090,59; -143,58) en el punt B de la figura anterior, a l'instant 0,35s el model estarà de nou en repòs, a l'instant 0,525s s'està aplicant una força de (0; -1090,59; 143,58)N en el punt C de la figura anterior, i a l'instant 0,7s el cos està de nou en repòs:

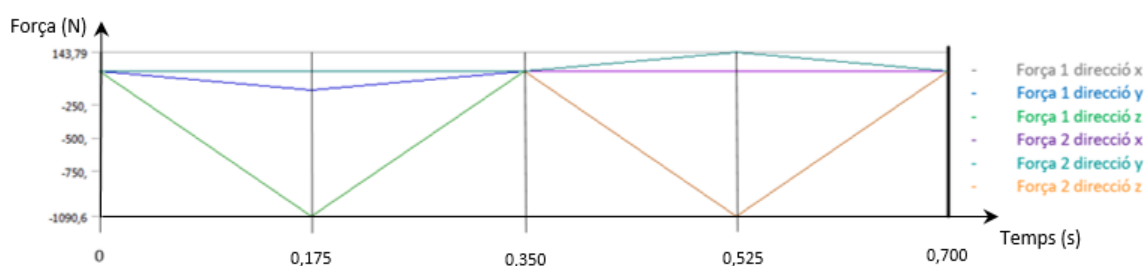
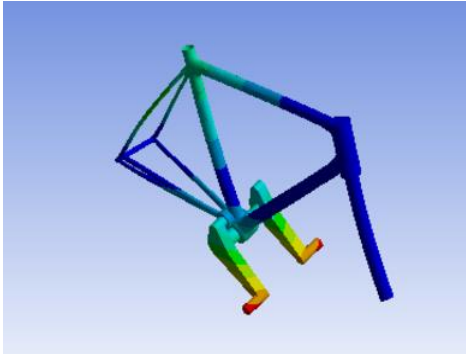
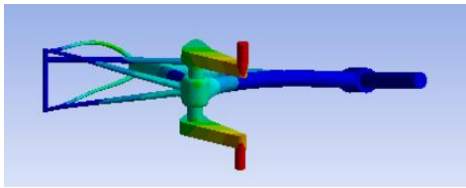
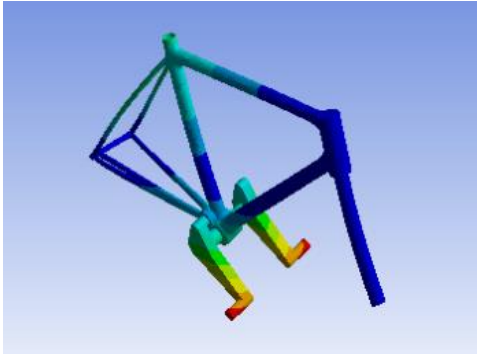
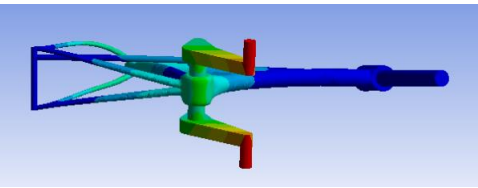
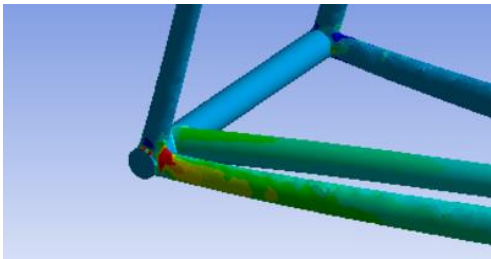
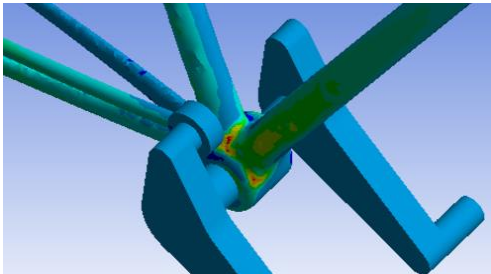
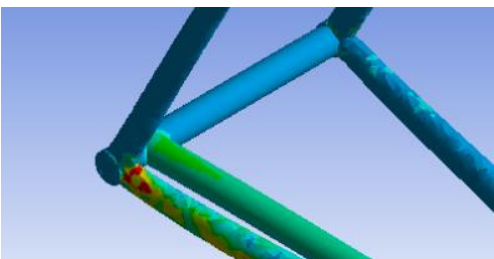
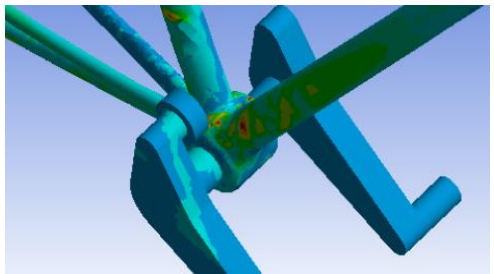
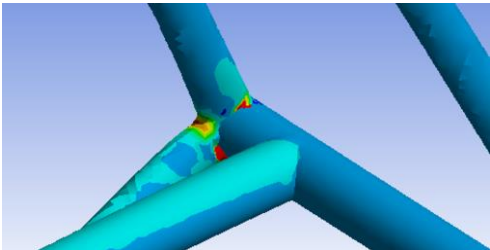
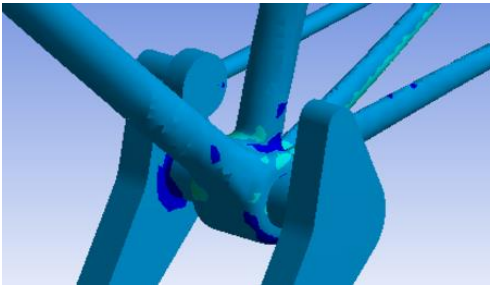
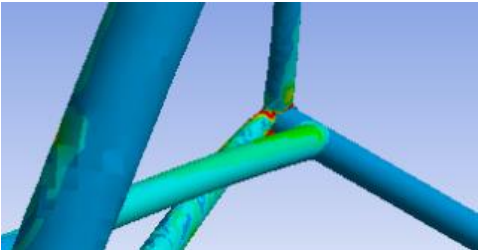
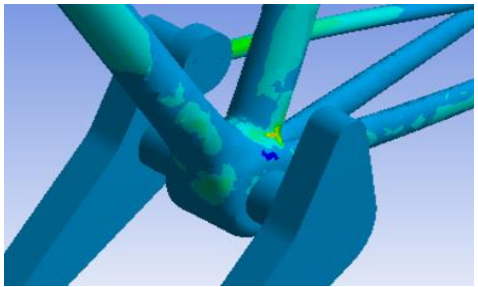
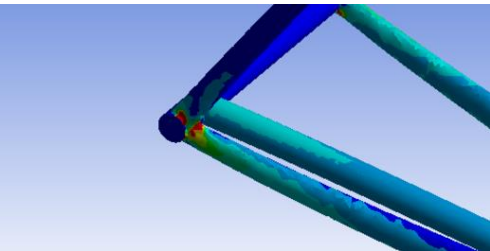
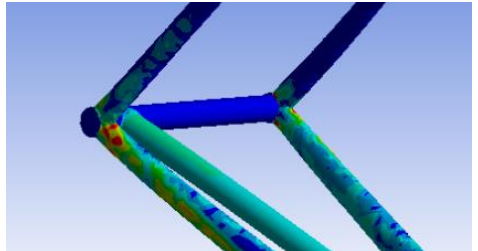


Fig. 4.36. Gràfic que mostra els valors de les forces 1 i 2 en els diferents instants de la simulació.

Un cop establerts el nombre de subpassos, el temps total de de la simulació, el disseny i les forces que s'apliquen en aquest disseny, s'ha realitzat la simulació, de la què s'han obtingut els següents resultats. Es mostren els resultats gràfics per als dos finals, el d'alumini i el de fibra de carboni i en els resultats numèric s'hi ha afegit també els resultats obtinguts amb el disseny inicial simple malgrat que aquests, com ja s'ha comentat amb anterioritat no seran valorats i només han estat afegits com a mostra de la millora de prestacions que ha comportat la millora del disseny.

	Disseny Final d'Alumini	Disseny Final Fibra de Carboni
Deformació total	 	 
Tensions màximes a tracció	 	 



	Disseny Final d'Alumini	Disseny Final Fibra de Carboni
Tensions màximes a compressió	 	 
Tensions màximes de cisalla		

Taula 4.9. Visualització dels resultats de la simulació del test de pedaleig per al quadre final de fibra de carboni i per al quadre final d'alumini.

En aquesta taula es pot observar que les regions amb major deformació màxima així com les regions amb les majors tensions màximes a tracció, compressió i cisalla són les mateixes per als dos quadres finals, el de fibra de carboni i el d'alumini. Tal com s'ha explicat anteriorment, aquests paràmetres però, varien al llarg del temps, i és per això que s'ha decidit agafar els resultats gràfics al final del cicle de pedaleig complet ja que així s'està mostrant la deformació final que apareix fruit de tot el cicle de pedaleig i per tant, fruit de l'aplicació de totes les forces estudiades.

Pe que fa a la deformació màxima, es pot observar que aquesta apareix en els pedals d'acer, però tenint en consideració només el quadres, ja que són l'objecte d'estudi, s'observa que aquestes tenen lloc a la unió entre les beines superiors i la part superior del tub del seien.

Pel que fa a les tensions màximes de tracció i compressió aquestes es concentren en dues regions, una és la unió de les dues beines amb el suport de la roda posterior. Aquest resultat concorda amb els obtinguts en el règim estacionari ja que són les regions més primes de tot el quadre. L'altra regió de concentracions màximes de tensió és tota la regió que envolta el pedaler. Aquest fet també és coherent ja que és en aquesta regió la regió en la que s'apliquen les forces que presenten diferents direccions i provoquen moments flectors contraris i per tant unes tensions majors. Això a més quadra amb el fet que totes les bicicletes del mercat presenten un gran reforç en aquesta regió, reforç que ara s'ha pogut entendre.

Respecte a les tensions de cisalla, aquestes resulten màximes a la unió de les beines amb l'eix de la roda posterior, resultat que també concorda amb els obtingut en règim estacionari.

Tot seguit es mostren els resultats numèrics per als dos quadres estudiats així com els obtinguts en la simulació del disseny inicial simple. Aquests resultats apareixen per als 4 instants que s'han explicat anteriorment (sense comptar l'instant 0s).

Test de pedaleig	Temps (s)	Deformació màxima (m)	Tensió principal màxima Tracció (Pa)	Tensió principal màxima Compressió (Pa)	Tensió de cisalla màxima (Pa)
Quadre Inicial Alumini	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	0,175	4,72E-03	2,99E+08	-1,49E+08	1,81E+08
	0,35	1,16E-04	6,89E+06	-3,92E+06	4,83E+06
	0,525	4,09E-03	4,09E+08	-1,49E+08	2,04E+08
	0,7	1,32E-04	7,44E+06	-4,33E+06	5,38E+06
Quadre Final Alumini	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	0,175	2,38E-03	2,71E+08	-2,63E+07	1,41E+08
	0,35	1,50E-05	2,42E+06	-1,32E+05	1,21E+06
	0,525	3,44E-03	3,41E+08	-2,58E+07	1,89E+08
	0,7	1,45E-05	1,85E+07	-4,10E+05	9,56E+06
Quadre Inicial Fibra de Carboni	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	0,175	3,46E-03	1,71E+08	-8,99E+07	1,05E+08
	0,35	6,25E-05	3,19E+06	-1,72E+06	1,91E+06
	0,525	3,07E-03	2,43E+08	-9,07E+07	1,21E+08
	0,7	7,62E-05	3,88E+06	-1,96E+06	2,22E+06
Quadre Final Fibra de Carboni	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	0,175	1,42E-03	1,62E+08	-1,32E+07	8,09E+07
	0,35	7,11E-06	1,21E+06	-4,78E+04	6,06E+05
	0,525	2,11E-03	2,28E+08	-1,94E+07	1,13E+08
	0,7	6,66E-06	1,10E+07	-1,07E+05	5,49E+06

Taula 4.10. Resultats numèrics del test de pedaleig



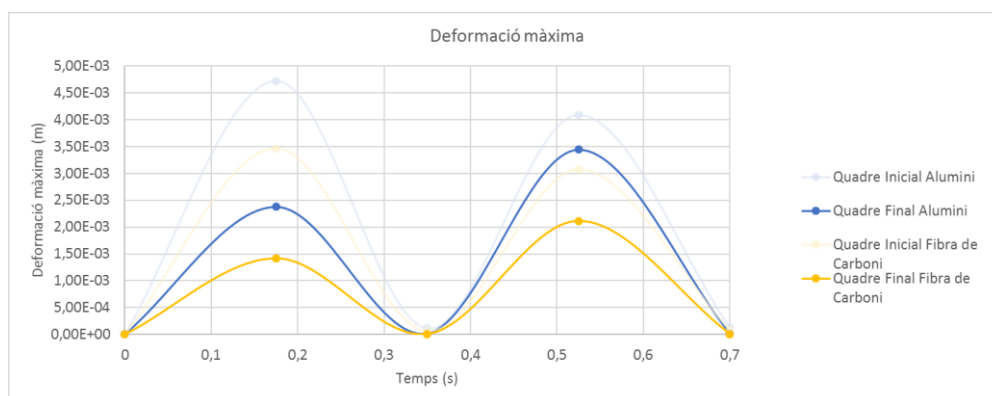


Fig. 4.37. Evolució de la deformació màxima al llarg d'un cycle de pedaleig per a cada un dels quadres estudiats.

En aquesta gràfica s'observa que cada cicle presenta dos pics de deformació màxima que corresponen a l'aplicació màxima de cada una de les forces. D'aquest dos pics, el que presenta uns valors majors és el que correspon a l'aplicació màxima de la 2a força, que té lloc a l'instant 0,525s. S'observa a més que el model que presenta una menor deformació en tot el cicle de pedaleig és el quadre de fibra de carboni mentre que el quadre d'alumini presenta una deformació màxima que arriba a assolir un valor un 39% major que la deformació del quadre de fibra de carboni a l'instant 0,525s.

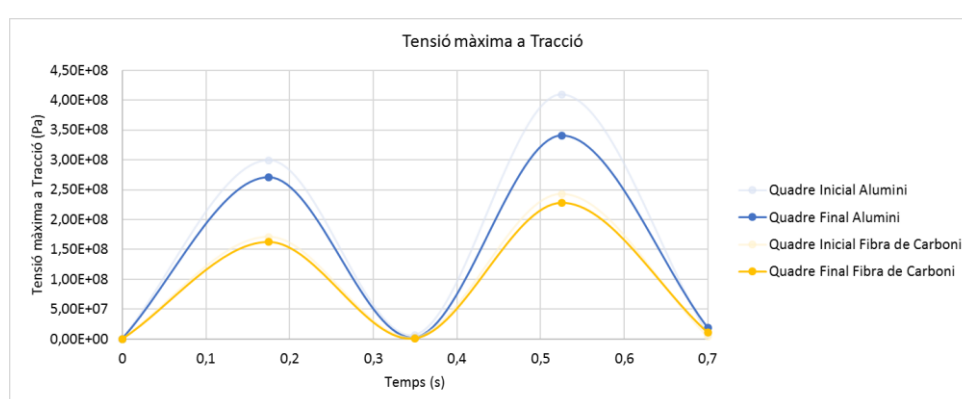


Fig. 4.38. Evolució de la tensió màxima a tracció al llarg d'un cycle de pedaleig per a cada un dels quadres estudiats.

En estudiar la tensió màxima a tracció es pot veure que, com en el cas de la deformació màxima, apareixen dos pics de tensions al llarg del cicle de pedaleig que corresponen als dos moments d'aplicació màxima de les forces.

També es pot observar que per el major pic de tensions és el corresponent a l'aplicació de la segona força mentre que el corresponent a la primera força és inferior. A més es pot veure que les tensions màximes a tracció per a tot el cicle de pedaleig són inferiors, al llarg de tot el cicle, per al quadre de fibra de carboni, assolint les màximes diferències en els instants de força màxima. Aquestes diferències de tensions són un 40% menors en l'instant d'aplicació màxima de la 1a força i d'un 32% en l'instant d'aplicació màxima de la 2a força al quadre de fibra de carboni respecte al quadre d'alumini.

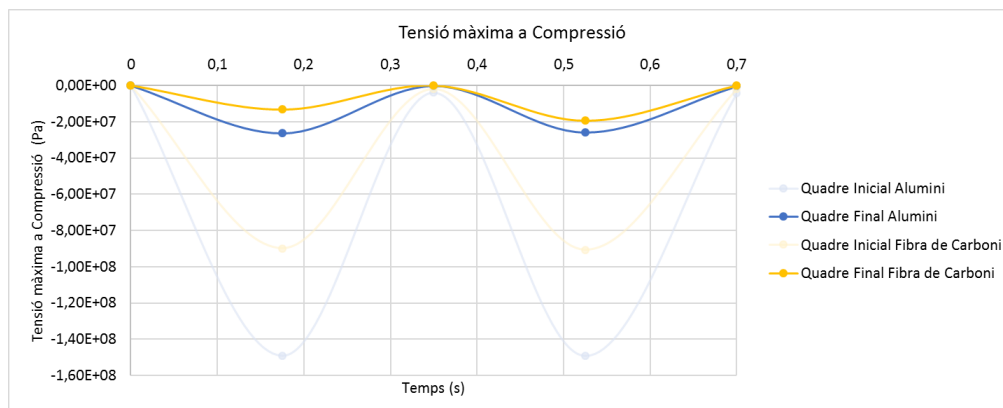


Fig. 4.39. Evolució de la tensió màxima a compressió al llarg d'un cicle de pedaleig

Per a cada un dels quadres estudiats es pot veure com les tensions màximes a compressió presenten de nou dos pics en els instants d'aplicació màxima de les forces.

Per a tot el cicle la tensió màxima de quadre de fibra de carboni és menor a la del quadre d'alumini tot assolint la diferència màxima d'un 50% menor en l'instant 0,175.



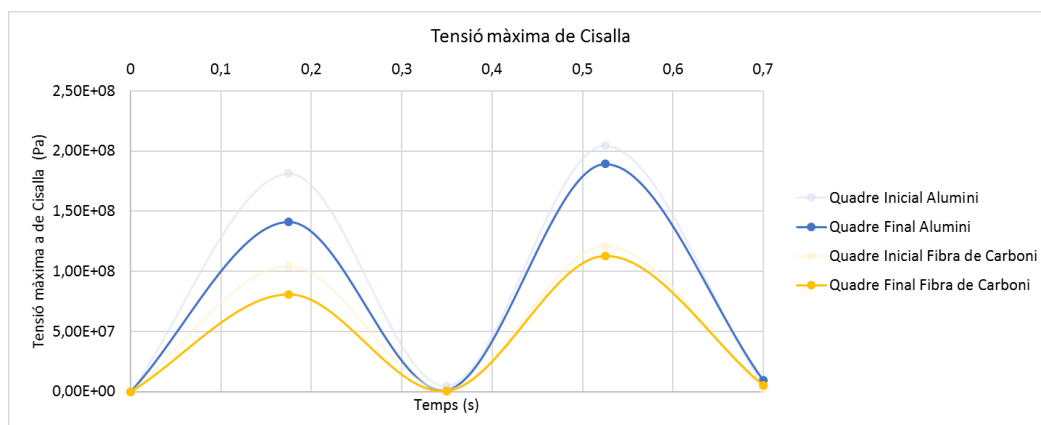


Fig. 4.40. Evolució de les tensions màximes de cisalla al llarg d'un cicle de pedaleig

Finalment pel que fa a les tensions màximes de cisalla es pot veure que de nou presenten els dos pics de tensió, i el quadre de fibra de carboni presenta unes tensions menors al llarg de tot el cicle essent aquestes de fins a un 40% menors a les del quadre d'alumini en els dos instants de màxima aplicació de les forces.

En definitiva, després de realitzar la simulació del test per a un cicle complet de pedaleig, s'ha pogut determinar que el quadre de fibra de carboni aporta una reducció de la deformació màxima de fins a un 39% i pel que fa a les tensions, pel fet de ser les màximes les tensions a tracció, aquest mateix quadre ha comportat una reducció de fins a un 40% d'aquestes tensions internes màximes.

4.4.2.4. Test de xoc amb massa caient

L'objectiu d'aquest test era estudiar la reacció dels diferents quadres en els instants en els que es produeix un xoc frontal.

Per a aquest estudi s'ha agafat com a referència el test de xoc amb massa caient de la normativa europea. En aquest test es fixa el quadre pels suport de la roda posterior en posició vertical, és a dir que l'eix que uneix les dues rodes és perpendicular al terra. Tot seguit es situa un pes de 22,5 kg a una distància de 0,212m de la forquilla davantera en direcció vertical, i es deixa caure aquesta sobre la forquilla, o la barra d'acer que la

substitueix.

A continuació es mostra la representació gràfica del test de la normativa europea.

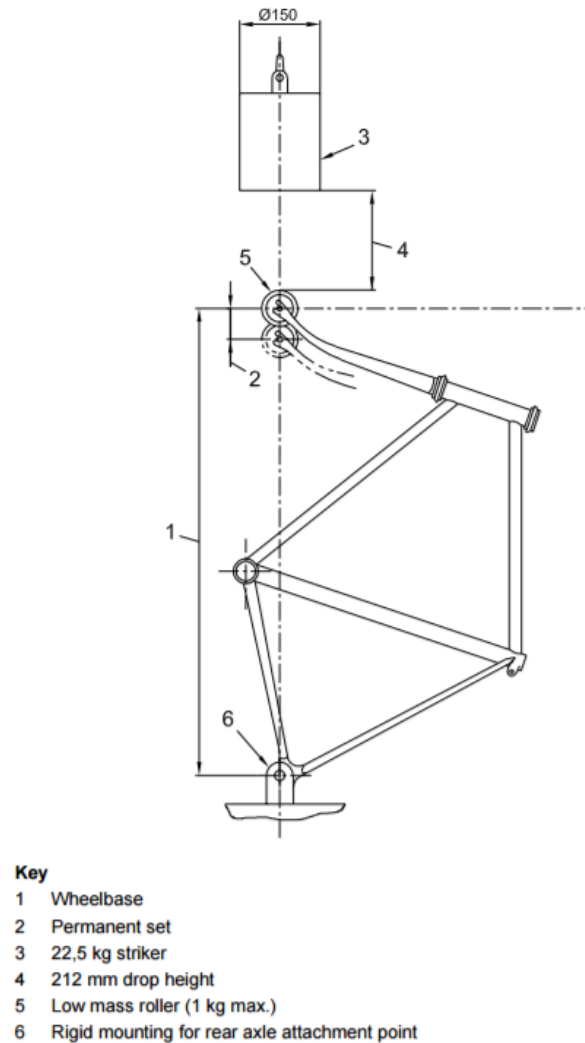


Fig. 4.41. Representació gràfica del test d'impacte amb massa caient de la normativa de seguretat europea

Per a la realització d'aquest test, s'ha utilitzat una eina que proporciona l'Ansys Workbench anomenada *Explicit Dynamics*, que és un tipus de simulació expressament dissenyada per a la recreació i anàlisi de xocs o impactes. Aquest tipus de simulació té especialment desenvolupada la part d'interacció entre els diferents cossos d'estudi i és capaç d'anar modificant-la al llarg del temps tot permetent que aquests interactuïn entre ells sense



solapar-se o sobreposar-se, cosa que passaria en un anàlisi transitori convencional.

Aquest test però requereix tenir un coneixement de la corba de resiliència dels materials utilitzats i com que no s'ha pogut disposar d'aquesta corba per a la fibra de carboni no s'ha pogut realitzar aquest estudi amb aquest material.

Malgrat això, i com que l'alumini sí que està completament definit pel programa, s'ha decidit fer l'estudi per al quadre d'alumini.

Les simulacions d'Ansys Explicit Dynamics, pel fet de calcular interaccions molt complexes entre els diferents cossos estudiats, requereix uns temps de càlcul molt llargs, molt més que els d'un anàlisi transitori convencional, i per tal de reduir-los, el propi programa limita la durada de les simulacions a poques fraccions de segon.

Això ha comportat la impossibilitat de simular el test complet des que es deixa caure el pes de 22,5 kg amb una velocitat inicial igual a zero fins a uns segons posteriors a l'impacte. Així doncs, s'ha decidit estudiar la reacció del quadre des de l'instant de contacte de la forquilla davantera amb el pes fins transcorreguts 0,0005s del des del primer contacte. S'ha decidit agafar aquesta fracció de temps ja que és la durada màxima que pot tenir la simulació mantenint un temps de càlcul raonable ja que durades majors com ara 0,005s haguessin requerit un temps de càlcul de diversos dies.

Un cop establerta la part del xoc que s'estudiarà s'han disposat correctament els diferents element que formaran part de la simulació en l'instant inicial, és a dir, s'ha fixat la forquilla amb el quadre i s'ha situat el cilindre de 22,5 kg per tal que aquest tingui tan sols un punt de contacte tangent amb la forquilla.

Tot seguit s'han calculat les condicions inicials de la simulació i s'ha determinat el nombre de dades que s'obtidrien al llarg d'aquesta. S'ha decidit disposar de resultats per a 20 instants ja que com que les variacions resultants seran molt petites, per al poca durada de la simulació, això permetrà veure amb més claredat l'evolució de les deformacions i les tensions màximes.

S'ha definit una acceleració en la direcció de desplaçament del pes de -9,81 m/s que correspon a l'acceleració de la gravetat i s'ha calculat la velocitat a la que anirà el pes a l'instant de contacte amb la forquilla. Per aquest càlcul s'han utilitzat les equacions del moviment rectilini uniformement accelerat prenent com a temps inicial 0 s ($t_0=0s$) i com a velocitat inicial 0 m/s ($v_0=0s$) que apareixen a continuació:

$$x = x_0 + v_0 t - \frac{1}{2} a t^2$$

$$0,212 = 0 + 0 \cdot t - \frac{1}{2}(-9,81) \cdot t^2$$

$$t = 2,0790s$$

$$v = at$$

$$v = 2,0395m/s$$

Un cop establertes les condicions inicials i d'entorn i d'haver fixat l'extrem posterior del quadre, s'ha prosseguit amb el disseny i la realització de la simulació.

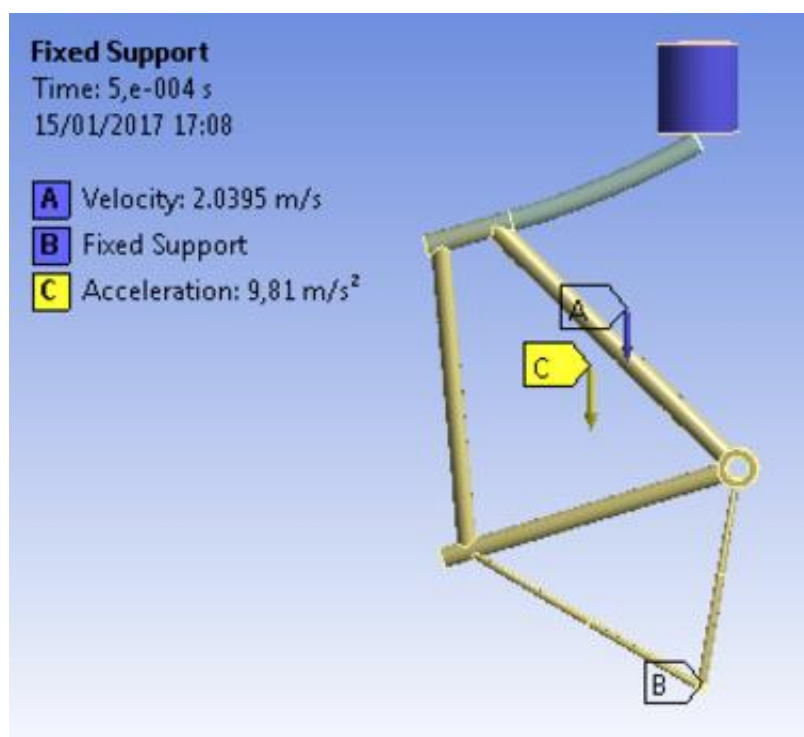


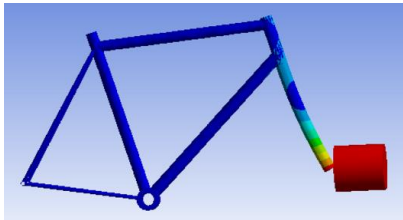
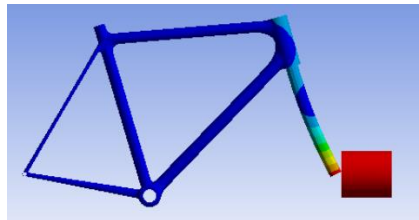
Fig. 4.42. Disseny de la simulació de xoc amb massa caient. La velocitat (A) correspon a la velocitat del cos remarcant de color blau, el pes; el punt fix (B) correspon a l'extrem posterior del quadre fixat i l'acceleració (C) està definida per a tot el medi de la simulació

Aquesta simulació, a diferència de les realitzades amb anterioritat, no ha estat capaç



d'aportar resultats gràfics coherents més enllà de la deformació màxima, probablement perquè en ella s'ha dut l'equip informàtic al límit de les seves possibilitats i el programa prioritza l'obtenció de resultats numèrics a l'obtenció de resultats gràfics.

Tot seguit es mostra el resultat gràfic de la deformació deguda a l'impacte durant el temps de simulació. En aquest test, a falta de disposar dels resultats del quadre final de fibra de carboni, s'ha cregut adequat presentar els valors gràfics i numèrics tant del quadre final d'alumini com del disseny inicial simple d'alumini.

	Disseny Inicial Alumini	Disseny Final Alumini
Deformació total		

Taula. 4.11. Visualització dels resultats gràfics de deformació total del test de xoc amb massa caient del quadre final d'alumini i del quadre inicial

Tal com s'observa en els resultats gràfics de cada una de les dues deformacions, la major part de la deformació té lloc a la forquilla i degut al curt temps de durada de la simulació, no es pot observar realment l'efecte del xoc en el conjunt del quadre. Tot seguit es mostren els resultats numèrics de les dues simulacions realitzades.

	Temps	Deformació màxima (m)	Tensions màximes a tracció (Pa)	Tensions màximes a compressió (Pa)	Tensions màximes de cisalla (Pa)
Disseny inicial d'Alumini	0,00E+00	0	0	0,00E+00	0
	2,50E-05	0	1,63E+07	-1,52E+07	5,50E+07
	5,01E-05	0	2,77E+07	-2,03E+07	7,90E+07
	7,51E-05	2,15E-08	3,39E+07	-1,81E+07	7,77E+07
	1,00E-04	1,63E-06	4,61E+07	-1,40E+07	6,54E+07
	1,25E-04	5,12E-06	5,47E+07	-1,01E+07	5,10E+07
	1,50E-04	9,81E-06	6,01E+07	-7,39E+06	3,99E+07
	1,75E-04	1,75E-05	6,32E+07	-5,38E+06	3,29E+07
	2,00E-04	2,45E-05	6,82E+07	-4,43E+06	3,41E+07
	2,25E-04	2,78E-05	7,13E+07	-3,41E+06	3,57E+07
	2,50E-04	3,69E-05	7,06E+07	-2,63E+06	3,54E+07
	2,75E-04	5,55E-05	6,55E+07	-2,47E+06	3,55E+07
	3,00E-04	6,13E-05	6,37E+07	-2,71E+06	3,39E+07
	3,25E-04	6,38E-05	6,48E+07	-5,20E+06	3,23E+07
	3,50E-04	6,81E-05	7,98E+07	-8,76E+06	3,97E+07
	3,75E-04	8,02E-05	9,80E+07	-1,11E+07	4,89E+07
	4,00E-04	1,14E-04	1,17E+08	-1,55E+07	5,86E+07
	4,25E-04	1,40E-04	1,32E+08	-1,77E+07	6,61E+07
	4,50E-04	1,55E-04	1,40E+08	-1,69E+07	7,01E+07
	4,75E-04	1,54E-04	1,35E+08	-1,02E+07	6,81E+07
	5,00E-04	1,88E-04	1,20E+08	-9,56E+06	6,10E+07
Disseny final d'Alumini	0,00E+00	0,00E+00	0	0	0
	2,50E-05	3,27E-13	1,48E+07	-2,71E+07	4,55E+07
	5,00E-05	6,55E-13	2,46E+07	-3,99E+07	6,82E+07
	7,50E-05	3,53E-06	2,93E+07	-4,06E+07	7,05E+07
	1,00E-04	1,57E-06	4,14E+07	-3,59E+07	6,26E+07
	1,25E-04	4,52E-06	4,99E+07	-2,91E+07	5,15E+07
	1,50E-04	8,50E-06	5,58E+07	-2,32E+07	4,12E+07
	1,75E-04	1,55E-05	5,97E+07	-1,87E+07	3,35E+07
	2,00E-04	2,23E-05	6,46E+07	-1,54E+07	3,31E+07
	2,25E-04	2,77E-05	6,85E+07	-1,30E+07	3,41E+07
	2,50E-04	3,36E-05	6,86E+07	-1,01E+07	3,42E+07
	2,75E-04	4,28E-05	6,48E+07	-8,23E+06	3,38E+07
	3,00E-04	4,94E-05	6,33E+07	-7,68E+06	3,51E+07
	3,25E-04	5,63E-05	6,07E+07	-7,80E+06	3,45E+07
	3,50E-04	6,41E-05	6,30E+07	-8,09E+06	3,58E+07
	3,75E-04	6,98E-05	7,16E+07	-8,14E+06	4,90E+07
	4,00E-04	9,52E-05	8,76E+07	-9,84E+06	5,57E+07
	4,25E-04	1,21E-04	1,06E+08	-1,10E+07	6,06E+07
	4,50E-04	1,41E-04	1,11E+08	-9,94E+06	6,50E+07
	4,75E-04	1,54E-04	9,99E+07	-9,13E+06	6,31E+07
	5,00E-04	1,68E-04	8,19E+07	-8,14E+06	5,83E+07

Taula_ 4.12. Resultats numèrics del test de xoc amb massa caient del quadre final d'alumini i del quadre inicial d'alumini.

Com que no ha pogut ser realitzat l'estudi amb el quadre de fibra de carboni no s'ha pogut arribar a cap conclusió respecte a la fragilitat del quadre dissenyat i per tant no s'ha pogut saber si s'ha complert amb l'especificació referent a la fragilitat d'aquest.



5. Anàlisi global dels resultats

Un cop realitzades les simulacions, s'ha procedit a la valoració d'aquests resultats respecte a les especificacions plantejades donant lloc als resultats següents:

- El pes del quadre de fibra de carboni compleix amb l'especificació de pes màxim essent de 1,0853kg respecte de l'1,1kg màxim.
- La deformació màxima del quadre de fibra de carboni és un 40% menor de mitjana tant en els tests estacionaris com en el de pedaleig. Això porta a poder a firmar que aquest quadre millora en un 40% la rigidesa del quadre d'alumini plantejat.
- Com que el pes del quadre de fibra de carboni és el mateix que el del quadre d'alumini establert per l'empresa, la millora de la relació rigidesa-pes és directament la millora de la rigidesa del quadre de fibra de carboni respecte al quadre d'alumini, és a dir, d'un 40% respecte del 30% requerit.
- Les tensions màximes del quadre de fibra de carboni presenten una reducció d'entre un 37% i un 40% respecte a les del quadre d'alumini; atès que es requeria un 30% de millora es compleix amb l'especificació.
- Respecte a la fragilitat del quadre, no s'ha pogut arribar a cap resultat degut a la falta d'informació necessària. És sabut que la fibra de carboni, pel fet de presentar una major rigidesa, tendeix a tenir una fragilitat major a la de l'alumini. Això però no s'ha pogut estudiar i per tant, per falta d'informació no se sap si es compleix amb l'especificació. És per això que es considera prudent concloure que, fins a no disposar de noves dades, el quadre no compleix amb aquesta especificació.
- El disseny d'aquest quadre, pel fet de disposar de parts tubulars amb seccions relativament constants, permet que aquest sigui construït mitjançant la tècnica mixta de monocasc i tubs, que ja ha sigut anteriorment explicada. Aquesta geometria doncs permet complir amb l'especificació que impedeix que el mètode constructiu sigui d'un únic monocasc, un mètode molt complex i car.
- El procés de curat d'aquest disseny pot ser fet sense problemes en un autoclau al buit.
- Pel que fa a la inversió, no s'ha pogut fer un anàlisi econòmic acurat atès que es desconeixen la major part del conjunt de costos que intervenen en el procés de fabricació: subministraments, amortitzacions, recursos humans...

6. Pressupost

Per a la realització del càlcul dels costos que ha comportat aquest projecte, aquests es poden dividir entre els que són derivats dels recursos humans que s'han destinat a la seva realització i els costos del material emprat durant el treball. El costos derivats de l'energia i la il·luminació requerides per a la realització del treball no s'han considerat ja que són no significatius.

A continuació es mostra el pressupost per a les diferents partides que es deriven dels recursos utilitzats.

Pressupost dels recursos materials

A la taula següent es mostren les partides corresponents al material utilitzat durant el projecte. Per al càlcul del cost dels ordinadors s'ha considerat que la seva amortització es de tres anys i per tant s'ha determinat com a cost anual el seu cost total dividit per tres. Amb aquest cost anual, considerant un any equivalent a 1500h laborables, i que l'ús que se n'ha fet és de 300h per a cada un, s'ha dividit el cost anual entre les 1500h i s'ha multiplicat per les 300h d'ús. Pel que fa a les llicències amb un cost anual, també ha sigut considerat que un any equival a 1500h laborables i per tant els costos anuals de l'ús de cada llicència s'han obtingut dividint el cost anual de la llicència per les 1500h laborables i multiplicant-ho per les hores que ha estat utilitzat.

Concepte	Cost anual (€/any)	Hores projecte	Cost projecte (€)
Ordinador portàtil HP	266,33	300	53,27
Ordinador portàtil Asus	216,33	300	43,27
Llicència Microsoft Office	69	60	2,76
Llicència Ansys 15	6500	150	650
Llicència Solidworks	8500	50	283,33
	Total		1032,63 €

Taula 6.1. Pressupost dels recursos Materials

Pressupost dels recursos humans

Per al càlcul d'aquest cost s'ha agafat com a referència el preu per hora que paga l'empresa HP per a la realització de cada una de les tasques. Cada crèdit ECTS equival a una dedicació orientativa de 25 hores amb la qual cosa s'obté un total de 300 hores destinades a aquest projecte. Tot seguit es desglossa aquest temps en funció de la tasca que s'ha estat desenvolupant i el seu preu.

Concepte	Preu (€/h)	Hores	Cost (€)
Estudi previ	30	40	1200
Disseny en Solidworks	30	50	1500
Simulació amb Ansys	80	110	8800
Anàlisi de les simulacions	80	40	3200
Redacció	30	60	1800
Tutorització	100	30	3000
Total			19500,00 €

Taula 6.2. Pressupost dels recursos Humans

Pressupost general

Finalment les diferents partides s'han ajuntat en el pressupost global, que considera totes les despeses del projecte.



Concepte	Cost (€)
Recursos materials	1032,63
Recursos humans	19500,00
Total	20532,63 €

Taula 6.3 Pressupost dels recursos Totals

Si aquest projecte prosseguís endavant, en aquest pressupost s'hauria d'afegir el cost de les provetes de fibra de carboni així com el cost de fabricació del prototip i de realització de les simulacions.

Si el projecte es portés a la fabricació de quadre, caldria valorar detalladament tots els costos empresarials associats (matèria primera, subministraments, amortitzacions, recursos humans...).

7. Impacte ambiental

En aquest apartat s'ha intentat determinar els efectes que s'han produït sobre el medi ambient derivats d'aquest projecte.

Les activitats desenvolupades durant aquest treball es poden definir majoritàriament dins de l'àmbit de la informàtica, concretament del disseny i simulació amb eines informàtiques. Això fa que l'impacte ambiental sigui d'una dimensió petita ja que no es genera directament cap producte contaminant. Malgrat això, durant tot el desenvolupament del treball, pel fet d'estar utilitzant ordinadors, s'ha consumit electricitat i, per tant, s'han generat emissions de CO₂ indirectament. Tot seguit es detallen aquestes emissions:

Element de consum	Temps de consum (h)	Potència consumida (W)	Emissió de CO ₂ (kg)
Ordinador	300	250	22,65
Elements d'il·luminació	230	100	6,95
EMISSIONS TOTALS DE CO₂			29,60 kg

Taula 7.1 Emissions de CO₂ generades durant el projecte

Pel càlcul de les emissions de CO₂ es considera el mix de producció bruta d'energia elèctrica general recomanat per l'OCCC (Oficina Catalana pel Canvi Climàtic), que per l'any 2015 va ser de 302 g CO₂/ kWh.

El material emprat en l'elaboració del treball, els ordinadors i les lluminàries usades, té una vida llarga cosa que implica que, si se'n fa un reciclatge adequat quan s'acaba la seva vida útil, el seu impacte ambiental és molt reduït.

Així doncs, i assumint que es realitza un correcte reciclat del material utilitzat durant el projecte, l'impacte ambiental total d'aquest treball és l'emissió de 29,6 kg de CO₂.

Aquest projecte però pot arribar a comportar un impacte major si es dona el cas que es



duguin a terme els assajos experimentals indicats en aquest treball i la construcció del prototip i s'iniciï la fabricació del quadre.

En aquest supòsit, l'impacte ambiental seria major fruit per una banda del derivat de l'energia consumida per a la construcció del quadre, en especial l'energia necessària per al funcionament de l'autoclau. Per l'altra, el major impacte seria fruit del reciclat de la fibra un cop acabada la seva vida útil. El reciclat de la fibra de carboni, pel fet de ser un material compost amb un polímer termostable és molt més complicat i poc exitós que el de l'alumini, que amb un correcte reciclat permet que sigui reutilitzat amb unes prestacions molt similars a la del material inicial. Això provoca una major petjada de carboni, i per tant un major impacte ambiental que si la bicicleta fos construïda amb alumini.

Malgrat això, la construcció de la bicicleta de fibra de carboni pot comportar que un cert nombre de persones canviïn de mitjà de transport, tot deixant d'utilitzar mitjans de transport molt més contaminants com el cotxe o la moto tot substituint-los per la bicicleta, ja que la millora de prestacions que aporta el quadre de fibra de carboni respecte al d'alumini redueix l'esforç requerit per a desplaçar-se en bicicleta i en conseqüència pot afavorir a que més usuaris adoptin la bicicleta com a mitjà de transport més sostenible.

8. Planificació

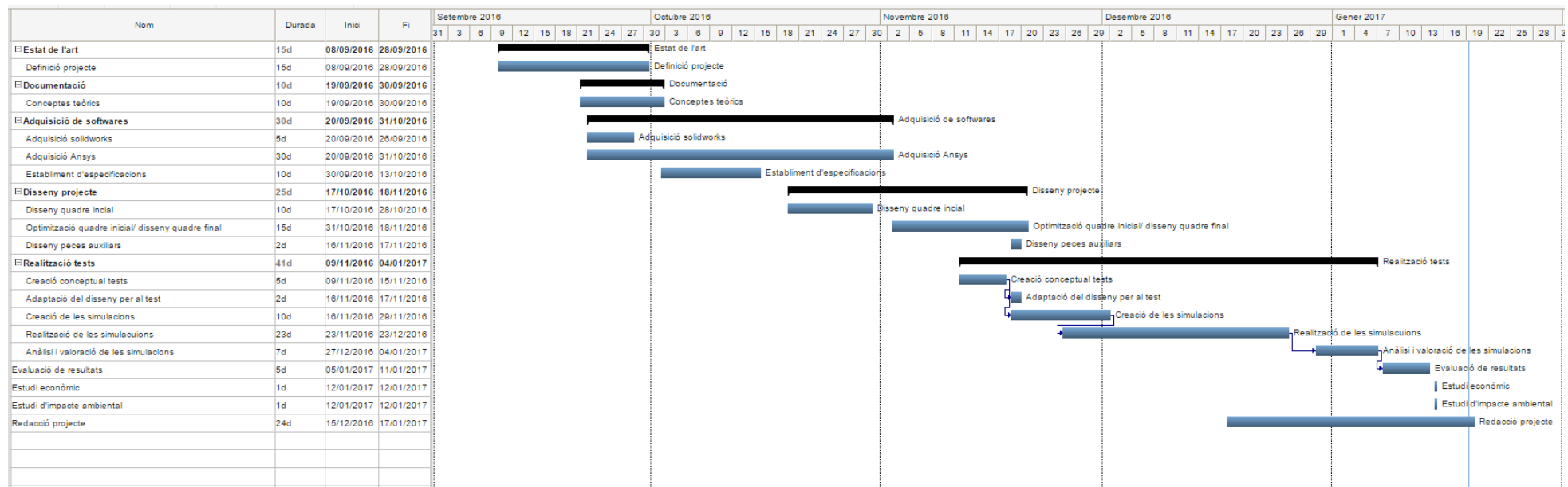


Fig. 8.1. Diagrama de Gant de la planificació del projecte

9. Conclusions

- En aquest projecte s'ha aconseguit complir amb la majoria d'especificacions requerides per a l'acceptació com a bo del quadre de fibra de carboni dissenyat:

Concepte	Valor requerit	Requeriment assolit
Tipus de bicicleta	Bicicleta de carretera	✓
Talla de la bicicleta	Talla 58	✓
Pes màxim	1,1 kg	✓
Relació Rigidesa- Pes	Millora d'un 30% respecte quadre d'alumini	✓
Tensions internes	Reducció d'un 30% respecte quadre d'alumini	✓
Fragilitat	Un 20% major a la del quadre d'alumini com a màxim	✗
Procés de fabricació	Autoclau	✓
Mètode de fabricació	No un únic monocasc	✓
Inversió	Menor de 40000€	No avaluable en aquest estudi
Preu de venda màxim	3000€	✓

Tot seguit indico les conclusions personals generades per aquest treball:

- Aquest projecte m'ha permès arribar a dominar el programa Ansys Workbench, eina molt útil en el desenvolupament de projectes d'enginyeria industrial.
- També m'ha permès aprofundir molt en els meus coneixements respecte a la fibra de carboni, un material de futur per les seves grans propietats.
- El desenvolupament del treball m'ha portat a valorar la importància dels aspectes impacte ambiental, pressupost i planificació, aspectes poc treballats al llarg dels

meus estudis i imprescindibles per a les meves tasques futures com a enginyer industrial.

- Aquest projecte a més m'ha permès aprendre a desenvolupar un projecte, des de la seva idea fins als resultats finals, i m'ha portat a veure que en un futur m'agradaria poder treballar en projectes de recerca i desenvolupament de nous productes.

Agraïments

Voldria agrair a l'Emilio Angulo l'ajuda i guia que m'ha prestat en tot moment durant aquest projecte fet que m'ha permès arribar als resultats obtinguts i en especial les seves aportacions en la manera d'enfocar els estudis i en general en el conjunt del treball.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

Exemples de llibres, articles, catàlegs, material informàtic i material obtingut a la xarxa:

- [1] PAUL J. WALSH, *Carbon Fibers*, ASM Handbook, Volume 21, Composites, 2001
- [2] JOHN D. BUCKLEY & DAN D. EDIE, *Carbon-Carbon Material and composites*, Noyes Publications 1993
- [3] MARCOS GRANDA, *Breas: origen, composición y comportamiento en pirolisis*, Bol. Grupo Español Carbón, nº20/Junio 2011
- [4] [http://2014.feltracing.com/assest_img/technology_docs/Carbon.pdf], 5 de Novembre de 2016]
- [5] BRANISLAV DULEBA & FRANTISEK GRESKOVIK, Simulation of Loading the Polymer/Carbon Fiber Composites and Prediction of Safety Factors, IJEIT Volume 2, Issue 8, February 2013
- [6] [[http://problemsolversbike.com/files/tech/Bottom Bracket Standards Reference.pdf](http://problemsolversbike.com/files/tech/Bottom_Bracket_Standards_Reference.pdf)], 3 d'Octubre de 2016]
- [7] [<http://www.feltbicycles.com/USA/2016/Bikes/road/race/FR/FR1-Frame-Kit.aspx>], 8 d'Octubre de 2016]
- [8] UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA. SERVEI DE LLENGÜES I TERMINOLOGIA. *Guia lingüística pràctica 2*. Barcelona, 1998.